

# UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS  
Departamento de Óptica



## TESIS DOCTORAL

**Desarrollo de las dos torres: monitor de protones de base optoeléctrica  
para uso espacial.  
Primeros datos en órbita LEO a bordo del satélite Nanosat-1B**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**Juan José Jiménez Martín**

Directores  
Héctor Guerrero Padrón  
Jaime Sánchez Páramo

**Madrid, 2016**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Departamento de Óptica**



**TESIS DOCTORAL**

**DESARROLLO DE LAS DOS TORRES:**

**MONITOR DE PROTONES**

**DE BASE OPTOELECTRÓNICA PARA USO ESPACIAL.**

**PRIMEROS DATOS EN ÓRBITA LEO A BORDO DEL SATÉLITE**

**NANOSAT – 1B**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

**PRESENTADA POR:**

**Juan José Jiménez Martín**

**DIRIGIDA POR LOS DOCTORES:**

**Héctor Guerrero Padrón**

**Jaime Sánchez Páramo**

**Madrid, 2015**





**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Departamento de Óptica**

**TESIS DOCTORAL**

**DESARROLLO DE LAS DOS TORRES:**

**MONITOR DE PROTONES**

**DE BASE OPTOELECTRÓNICA PARA USO ESPACIAL.**

**PRIMEROS DATOS EN ÓRBITA LEO A BORDO DEL SATÉLITE**

**NANOSAT – 1B**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

Doctorando: Juan José Jiménez Martín  
Licenciado en Ciencias Físicas  
INTA

Directores: Héctor Guerrero Padrón  
Doctor en Ciencias Físicas  
INTA

Jaime Sánchez Páramo  
Doctor en Ciencias Físicas  
SENER Ingeniería y Sistemas



Madrid, 2015





*A mi mis padres y hermana*

*A Rita y Tomás*



## Agradecimientos

---

Son ya una pila los años desde que me encontré con Héctor por casualidad en “Los Gatos” tomando cañas y le dije que estaba terminado la carrera y que quería currar en el INTA. Salí de allí con pocas esperanzas, y alguna cerveza, pero a los pocos meses tenía una beca de doctorado “Rafael Calvo Rodés” y Héctor era mi feje directo, director de tesis, maestro y compañero de cañas. Es, indudablemente, a quien más le debo el haber podido realizar con éxito este trabajo de tesis, y no solo por sus aportaciones científico/técnicas e ideas innovadoras, visión de futuro, criterio, y su capacidad de motivación y de inspirar (the Force is strong with this one) o por enseñarme a usar el torno y la fresa para los montajes, sino también por sus dotes de líder, de gestión y su capacidad resolutive y de trabajo que me han enseñado y motivado tanto.

Unos años más tarde llegó Jaime, mi otro co-director, con quien he pasado largas horas de discusiones sobre LDT (Las Dos Torres) y su principio de funcionamiento... Bueno, esa es mi visión, él dice que era yo el único que hablaba, que preguntaba y que a continuación me respondía solo. Ese no es mi recuerdo, para mí fue clave tu presencia y tu comprensión. Durante tu paso por el INTA insuflaste un poco de aire nuevo que le dio a esta tesis un gran empujón que ha sido determinante para lo que ha terminado siendo.

Es evidente que todo este desarrollo no hubiera sido posible sin los que han desarrollado el hardware y el software que forman parte del instrumento y de los sistemas de ensayo y de la calibración. Oter, especialista en electrónica analógica (clave para las corrientes de oscuridad), las electrónicas para las irradiaciones en la “piscina” son suyas (¡¡también las de LDT!!). Javi, gracias además por tu paciencia y por tu ayuda en las irradiaciones. Charly, que desarrolló la mayoría de la electrónica analógica para el sistema de caracterización optoelectrónica usado en las irradiaciones con protones. Mil horas hemos pasado irradiando y currando juntos en la preparación y ejecución de esos ensayos, pero también de cachondeo y de “cicloturismo extremo”. Un metabolismo como el mío necesita de gente como tú. Has conseguido que todo fuera más divertido y agradable. Ya en tiempos de Las Dos Torres llegó Víctor que se encargó del diseño de la parte digital de la electrónica de LDT y del SW embebido del PIC y la FPGA. Además algunas de las figuras 3D de la mecánica y electrónica son suyas. Con Joking, otro master del SW embebido, trabajé más tarde en otros proyectos fuera del marco de la tesis, pero esas tardes de bici por Paracuellos fueron un gran complemento a la jornada de trabajo.

Ha habido tanta gente con alguna relación con la tesis, que es inevitable que me olvide de alguien, pero querría mencionar a César, ‘el electrónico’ a cargo de los RadFET que me han servido para verificar el buen funcionamiento de LDT, y con el que fui a NSREC el año de Denver y la presentación de los primeros resultados de LDT. Una

lástima no haber trabajado más contigo, tienes mucho que aportar. Me alegro de haber compartido tantos buenos momentos, y *copelios*, contigo y con Ana.

Con los RadFet y la radiación espacial se pelea el grupo que actualmente dirige Maite. Ella nunca llegó a meterse a fondo en LDT, pero su conocimiento y experiencia estuvo siempre a mi disposición y en más de una ocasión tiré de ella para resolver alguna duda. ¡Gracias además por controlar el haz de protones durante la calibración! Tarea tediosa que requirió de una gran concentración y meticulosidad. Aunque quizá, lo que más te agradezco, es que me presentaras a tu hermana: “es nueva en la ciudad, enséñale Madrid y trátala bien”. Carlos, que perteneció al *rad team* hace ya unos años, me ayudó de forma muy directa tanto con los datos de los RadFet como generando algunos mapas de la AAS con diferentes modelos. Muy útiles tus lecciones de SPENVIS.

También quería mencionar a ‘Los Sergios’ (Estévez e Ibarria) que se encargaron de las simulaciones del entorno de radiación de LDT durante la etapa de diseño. Y ahora, durante la explotación, Ibarria ha realizado una de las simulaciones clave para la verificación del funcionamiento del instrumento en vuelo. Sus conocimientos sobre el entorno de radiación y sus efectos, y su participación en algunas irradiaciones, han sido también de gran ayuda.

También por el día a día con mis compañeros de despacho. Nen, a ti te he cogido alguna gráfica del TMP36. Espero poder robarte más en el futuro y que no sea necesario que me sigas corrigiendo el inglés. Ríos, ánimo ahí con la tuya. Además, ahora vas a tener tiempo, jeje. Tu visión y capacidad de darme otro punto de vista ha sido muy útil en muchas ocasiones. Israel, he aprendido un montón de cosas de la vida y de las relaciones entre personas contigo, que si bien no han sido de aplicación directa en la tesis (las he aprendido muy tarde) para el futuro sí me van a ser tremendamente útiles.

Ignacio, cualquiera que conozca el grupo sabrá que al final todo pasa por ti y que se puede contar contigo para resolver cualquier cosa. De más de un marrón técnico me has sacado, y en otros muchos, variopintos, me has metido. Tu experiencia en relación con los efectos de la radiación en dispositivos y tu mente analítica me ha servido en más de una conversación para descubrir algo nuevo. Eres además uno de los pocos que sigue toda la noche el cachondeo, eso es también de agradecer.

A los ‘términos’, en especial a Joaquín (aunque sé que detrás estaban también apoyando Manolo y Antonio). Al grupo de pequeños satélites del INTA, a cargo del NANOSAT y del Segmento Terreno donde se recibían los datos y se programaba el satélite y LDT. A todos, pero especialmente a Raúl, con el que más trato he tenido y tanto me ha ayudado con los TC, las TM, y con los datos de *housekeeping* del satélite. Y a Manolo, que entendió que LDT necesitaba ventanas de activación un poco más amplias y me lo

facilitó, aunque al final no se han podido hacer esas activaciones con el ACS, pero yo no pierdo la esperanza, cuando quieras nos ponemos a ello.

No puedo olvidarme de muchas otras personas del antiguo LOE con la que compartí muchísimos buenos momentos. Goyo, mi mentor en el manejo de LabVIEW (junto con Alberto del LINES) y gran compañero de juergas en los tiempos antiguos. Tú y Rafa, dos ‘magnéticos’ que estaban ya aquel día de Los Gatos. Marina, otra gran incombustible con la que se puede contar para lo técnico y lo personal, ahora Jefa del Laboratorio de Magnetismo por el que han pasado tantos amiguets, Víctor, Irene, Ruy, Miguel, Jose Luis y Ana, con con la que he tenido más relación y recibido más apoyo. Los ‘antiguos’ del grupo de optoelectrónica como Claudia y Javier Moreno, y Remo que sabe hablar la lengua de los elfos (¿quizá influyera en el nombre de este instrumento?). Y Susana, gracias especialmente por tus aportaciones a los índices bibliométricos.

A todos los que habitaban en el LINES cuando yo pasé por allí. Gonzalo, Marianela, fue un placer compartir la sala de becarios con vosotros.

En la parte administrativa, incuestionable la labor de Raquel, y también la de Chelo, Loli, Pilar e Idoia. También a Ángela María, ¡cuántas compras y contratos han salido gracias a ella! A Marival, jefa de Formación que me seleccionó para la beca y con ello me dio acceso al mundo INTA. Imprescindible también mencionar a Lola, jefa comprensiva, accesible y dispuesta a escuchar y ayudar y con la que me he sentido siempre respaldado, además de uno de los evaluadores de la tesis. En la UCM están Luismi y Pedro, cada uno con lo suyo me han facilitado un montón el tema burocrático allí. También debo mencionar a José, que de repente se vio como evaluador de la tesis y tuvo que leerla en dos días. Esta versión tiene muchas erratas corregidas, seguro que ahora es más fácil.

También debo mencionar a algunas personas de la antigua NAVTEQ, en especial a los que formaron parte de la *local office* de Santiago, pues el hueco que me hicisteis aquellas ‘vacaciones’ me sirvió para avanzar un montón, ¿recordáis los mapitas de colores?, pues fueron la base de una de las publicaciones y los veréis toditos si miráis la tesis más allá de aquí, jeje. Ya de la oficina de Madrid, buen rollito también con todos. Pilar, que decir, este negro sobre blanco, en parte es gracias a ti y a Nono. Merino, también quería nombrarte en estas líneas, lo paso siempre bien contigo, además de los tomates, los chorizos, las aventuras a caballo, BBQ...

De los amigos de toda la vida: *Pandos*, ya van la fotos, ¡pesaos! *MDBs*, a ver si este invierno me escapo con vosotros otra vez al monte, tengo ganas. *Rivas&Cia*, hay que retomar esos frontones. Con amigos como vosotros ha sido todo más fácil. Eloy, gracias y ¡ánimo! Jose Luis, Ana y Álvaro, esos grandes momentos culinarios, ¡Que no cesen! ¡ya estoy libre otra vez!



A vosotros familia, por vuestro incondicional apoyo. Incluso a ti tío Jose, que nunca me apoyaste, jeje. Papá, Mamá, vuestra ayuda y ejemplo de dedicación y trabajo duro ha sido la base. Incalculable el valor de las *chapuzillas caseras* (aunque Rebe se riera siempre de ellas) que me han hecho ser un poco más manitas, cualidad que me ha ayudado en todos los montajes experimentales. También por las revisiones buscando erratas. Rebe, ha sido un placer criarme contigo. Os quiero.

Rita, no tengo nada que decir, pues cualquier cosa que diga será poco, sin duda en el plano personal eres la que más ha sufrido mi dedicación a la tesis durante tanto tiempo, y más directamente mi ‘enclaustramiento’ casi total este último año y pico. Gracias por aguarlo, entenderme, apoyarme y ayudarme como lo has hecho. Tú ayuda no ha sido solo pasiva. Espero seguir recibiendo tu apoyo y amor, y vivir más momentos inolvidables, seguro que así será. Pero tranquila, esta ha sido la última tesis. Tomás, tranqui, tronco, lo bueno está por venir. Os quiero.

# Índice general

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>XI</b>
<b>MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>XVII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIX</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XXI</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 CONDICIONES AMBIENTALES DEL ENTORNO ESPACIAL	3
1.1.1 <i>El entorno de radiación</i>	6
1.1.2 <i>Modelos de radiación – Estimación del entorno</i>	11
1.2 INTERACCIÓN RADIACIÓN MATERIA Y EFECTOS SOBRE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	14
1.3 MAGNITUDES Y UNIDADES DE MEDIDA DE RADIACIÓN	18
1.4 DESARROLLOS ESPACIALES Y LA MADUREZ TECNOLÓGICA – TRL	27
<b>2 LDT: UN MONITOR DE RADIACIÓN</b>	<b>29</b>
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	30
2.1.1 <i>Efectos observables – Factor de daño y sensibilidad a la ionización</i>	30
2.1.2 <i>Efecto de los apantallamientos</i>	32
2.1.2.1 Caso I: Análisis de un sensor sin apantallar	35
2.1.2.2 Caso II: Análisis de un sensor apantallado homogéneamente	37
2.1.2.3 Caso III: Análisis de varios sensores con apantallamientos diferentes	38
2.1.2.4 Caso IV: Análisis de un apilamiento	41
2.2 VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	43
2.2.1 <i>Primera fase: irradiación de apilamientos de sensores – Efectos observables</i>	45
2.2.2 <i>Segunda fase: caracterización de los efectos – Matriz de daño</i>	49
2.3 MODELO DE LDT	55
2.3.1 <i>Caso general</i>	55
2.3.2 <i>Caso isotrópico</i>	58
2.4 CONCLUSIONES E IMPLICACIONES SOBRE LDT	64
<b>3 TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA LOS ENSAYOS DE RADIACIÓN</b>	<b>67</b>
3.1 INTRODUCCIÓN	68

3.2	INSTALACIONES .....	71
3.2.1	<i>Instalaciones gamma</i> .....	71
3.2.1.1	NAYADE (CIEMAT) – Madrid (España) .....	71
3.2.1.2	<i>Radiation Physics Laboratory</i> (USC) – Santiago de Compostela (España) .....	72
3.2.2	<i>Aceleradores de partículas</i> .....	73
3.2.2.1	LIF (UCL) – Louvain La Neuve (Bélgica) .....	75
3.2.2.2	RADEF (University of Jyväskylä) – Jyväskylä (Finlandia) .....	75
3.2.2.3	PIF (PSI) – Villigen (Suiza) .....	75
3.3	SISTEMAS DESARROLLADOS PARA LAS IRRADIACIONES DE LDT .....	76
3.3.1	<i>Irradiaciones Gamma</i> .....	76
3.3.2	<i>Irradiaciones pasivas con protones</i> .....	82
3.3.2.1	Selección de COTS .....	82
3.3.2.2	Caracterización de los elementos sensibles de LDT .....	89
3.3.3	<i>Irradiaciones activas con protones</i> .....	92
3.3.3.1	Prototipo de LDT – Los primeros apilamientos de fotodiodos .....	93
3.3.3.2	Caracterización energética – NIEL de la familia del S5107 .....	94
3.3.4	<i>Irradiación para calibrar LDT</i> .....	95
4	<b>LOS DISPOSITIVOS DETECTORES DE RADIACIÓN DE LDT</b> .....	107
4.1	SELECCIÓN DE LOS DETECTORES .....	108
4.1.1	<i>Irradiación de fotodiodos con rayos <math>\gamma</math></i> .....	110
4.1.2	<i>Irradiación con protones sobre LED</i> .....	115
4.1.3	<i>Irradiación con protones sobre fotodiodos</i> .....	117
4.2	NIEL DE LA FAMILIA DEL S5107 .....	123
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS DETECTORES DE LDT .....	127
4.3.1	<i>Fotodiodos</i> .....	129
4.3.1.1	Dependencia del factor de daño con la fluencia y el flujo .....	129
4.3.1.2	Modelización del “annealing” .....	132
4.3.1.3	Dependencia del factor de daño con la polarización de medida .....	134
4.3.1.4	Respuesta al flujo .....	137
4.3.2	<i>LED</i> .....	138
4.3.2.1	Dependencia del factor de daño con la fluencia y el flujo .....	138
4.3.2.2	Factores que afectan al “annealing” .....	143
4.4	CONCLUSIONES .....	144
5	<b>DISEÑO DE LDT</b> .....	149
5.1	INTRODUCCIÓN .....	150
5.2	FACTORES OPTO-GEOMÉTRICOS .....	150
5.2.1	<i>Determinación del tamaño y la reflectividad interior de los pisos</i> .....	153
5.2.1.1	Ensayo para determinar los parámetros adecuados .....	154

5.2.1.2	Ensayo térmico de verificación del comportamiento .....	157
5.2.2	<i>Determinación del espesor de los apantallamientos</i> .....	158
5.3	FACTORES ELÉCTRICOS .....	160
5.3.1	<i>Requisitos de la alimentación eléctrica de los sensores</i> .....	160
5.3.2	<i>Requisitos del rango y resolución de medida</i> .....	162
5.3.3	<i>Unificación de resultados</i> .....	166
5.4	SECUENCIA DE MEDIDA EN ÓRBITA .....	167
5.4.1	<i>Ensayo de aislamiento óptico</i> .....	169
5.4.2	<i>Conclusiones</i> .....	171
5.5	DESCRIPCIÓN FINAL DE LDT .....	173
<b>6</b>	<b>CALIBRACIÓN DE LDT</b> .....	<b>179</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	180
6.2	DETERMINACIÓN DE LAS ENERGÍAS UMBRALES .....	183
6.2.1	<i>Energías umbrales obtenidas</i> .....	185
6.2.2	<i>Conclusiones e Implicaciones</i> .....	189
6.3	DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD A LA RADIACIÓN .....	190
6.3.1	<i>Tratamiento de datos y representación de resultados</i> .....	191
6.3.2	<i>Resultado de la respuesta al flujo – Efectos transitorios ionizantes</i> .....	197
6.3.3	<i>Resultado de la respuesta a la fluencia – Efectos acumulativos por DD</i> .....	204
6.3.4	<i>Conclusiones e Implicaciones</i> .....	211
6.4	CALIBRACIÓN TÉRMICA .....	213
6.4.1	<i>Torre de luz</i> .....	214
6.4.2	<i>Torre de oscuridad</i> .....	217
6.4.3	<i>Sensor de temperatura TMP 36</i> .....	221
6.5	CONCLUSIONES .....	222
<b>7</b>	<b>PREPARACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN</b> .....	<b>225</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	226
7.2	ENTORNO DE RADIACIÓN DE NANOSAT-1B .....	226
7.2.1	<i>La órbita</i> .....	226
7.2.2	<i>Simulación del entorno de radiación</i> .....	234
1.1.1.1	Usando el modelo 3D de NANOSAT-1B .....	235
1.1.1.2	Usando la esfera hueca de aluminio .....	237
1.1.1.3	Validación de las simulaciones .....	240
1.1.1.4	Resultados aplicables a LDT .....	244
7.3	ACTIVACIONES DE LDT .....	245
7.3.1	<i>Estrategias de activación</i> .....	245
7.3.2	<i>Activaciones ejecutadas</i> .....	251

7.4	OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS.....	257
7.4.1	<i>Interpretación de las TM y filtrado de datos.....</i>	259
7.4.2	<i>Corrección térmica – separación de los efectos de DD y de ionización.....</i>	261
7.4.2.1	Determinación de la dependencia térmica en vuelo .....	261
7.4.2.2	Aplicación de la corrección térmica .....	266
7.4.3	<i>Separación de los efectos de DD e ionización .....</i>	269
7.5	CONCLUSIONES .....	272
<b>8</b>	<b>EXPLOTACIÓN – RESULTADOS EN ÓRBITA .....</b>	<b>273</b>
8.1	INTRODUCCIÓN .....	274
8.2	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.....	274
8.2.1	<i>Efectos de ionización.....</i>	274
8.2.1.1	Flujo equivalente instantáneo.....	274
8.2.1.2	Mapas de la AAS – Modelo Experimental Local de Protones de Nansoat-1B .....	278
8.2.2	<i>Efectos de DD – TNID .....</i>	281
8.2.2.1	Método directo: uso de los factores de daño .....	281
8.2.2.2	Método indirecto: integración de los datos del flujo .....	286
8.2.3	<i>Detección de eventos solares.....</i>	289
8.3	RESULTADOS FINALES EN ÓRBITA .....	290
8.3.1	<i>Intensidad de corriente medida en los fotodiodos de LDT.....</i>	291
8.3.2	<i>Efectos de ionización – Mapas de la AAS.....</i>	297
8.3.3	<i>Efectos de DD – TNID .....</i>	302
8.3.3.1	Dependencia temporal.....	302
8.3.3.2	Comparativa entre pisos .....	306
8.3.4	<i>Detección de eventos solares.....</i>	308
8.3.4.1	Comparación con los monitores de GOES – datos de SWPC de la NOAA.....	309
8.3.4.2	Falso positivo .....	313
<b>9</b>	<b>LOGROS, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>316</b>
9.1	TRABAJOS REALIZADOS Y PRINCIPALES APORTACIONES.....	317
9.2	CONCLUSIONES .....	324
9.3	LOS DOSÍMETROS DE DD DE LDT EN MARTE.....	327
9.3.1	<i>Mars MetNet Precursor Mision - MMPM .....</i>	328
9.3.2	<i>El programa Exomars (2016, 2018).....</i>	330
9.3.3	<i>Mars 2020 Rover.....</i>	332
9.4	TRABAJOS PENDIENTES Y LÍNEAS FUTURAS DE I+D .....	333
9.4.1	<i>Laboratorio de ensayo en órbita: TTT – SEOSAT / INGENIO.....</i>	333
9.4.2	<i>Verificaciones pendientes en la explotación de LDT .....</i>	335
9.4.3	<i>Sensores de DD en la exploración de Marte.....</i>	337
9.5	PUBLICACIONES CIENTÍFICO TÉCNICAS .....	338

9.5.1	<i>Índices bibliométricos de la producción científica asociada a la investigación realizada</i>	338
9.5.2	<i>Revistas internacionales</i> .....	339
9.5.3	<i>Congresos internacionales con acta de congreso (proceeding)</i> .....	340
9.5.4	<i>Congresos internacionales</i> .....	341
9.5.5	<i>Congresos nacionales</i> .....	341
9.6	FINANCIACIONES CONSEGUIDAS EN CONVOCATORIA PÚBLICAS.....	342
9.6.1	<i>En relación con la selección de dispositivos optoelectrónicos</i> .....	342
9.6.2	<i>En relación con el desarrollo de LDT</i> .....	343
9.6.3	<i>En relación con el desarrollo de TTT</i> .....	343
9.6.4	<i>En relación con la instrumentación de exploración en Marte</i> .....	343
<b>A</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LDT</b> .....	<b>347</b>
A.1	ENERGÍA UMBRAL FRONTAL.....	348
A.2	ENERGÍA UMBRAL LATERAL.....	349
A.3	CALIBRACIÓN FRONTAL DE MODELO FM .....	351
A.3.1	DD .....	351
A.3.2	Ionización.....	352
A.3.3	Parámetros para la ejecución del simulacro con el QM.....	353
A.3.4	Parámetros para la ejecución de la calibración de FM.....	354
<b>B</b>	<b>PLANOS Y DIAGRAMAS DE BLOQUES DE LDT</b> .....	<b>357</b>
<b>C</b>	<b>RESPUESTA DE LOS TMP-36 A LA RADIACIÓN EN LDT</b> .....	<b>363</b>
C.1	SENSIBILIDAD AL FLUJO .....	364
C.2	FACTOR DE DAÑO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA – TMP36.....	366
<b>D</b>	<b>DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LDT</b> .....	<b>369</b>
D.1	RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA CALIBRACIÓN DE DD .....	370
D.1.1	<i>Factores de daño torre de oscuridad</i> .....	370
D.1.2	<i>Factores de daño torre de luz</i> .....	371
D.1.3	<i>Factores de daño de los TMP-36 de la torre de oscuridad</i> .....	373
D.1.4	<i>Factores de daño de los TMP-36 de la torre de luz</i> .....	374
D.2	RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA AL FLUJO .....	376
D.2.1	<i>Sensibilidad flujo de la corriente de los fotodiodos de la torre de oscuridad</i> .....	376
D.2.2	<i>Sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de luz</i> .....	377
D.2.3	<i>Sensibilidad al flujo de la señal de los TMP36 de la torre de fotodiodos</i> .....	379
D.2.4	<i>Sensibilidad al flujo de la señal de los TMP36 de la torre de LED</i> .....	380
	<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>383</b>

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>397</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>401</b>

## Motivación y Objetivos

---

Los sistemas espaciales se ven sometidos a diferentes **condiciones ambientales** que los degradan y limitan su vida útil. Una de estas es el ambiente de radiación espacial el cual puede cambiar según las misiones y las épocas. Esto motiva que exista una gran actividad de I+D y de ingeniería de sistemas espaciales, encaminada a conseguir materiales, componentes, dispositivos e instrumentos cada vez más resistentes a la radiación. En paralelo existe también una línea cada vez más activa de prueba de dispositivos y componentes comerciales (COTS – *Comercial Off-The-Shelf*) para la evaluación de sus características y determinar si son o no son válidos para su uso en misiones espaciales.

Igualmente activo es el desarrollo de sensores de radiación para uso espacial y el estudio del entorno de radiación de una misión concreta. Toma fuerza el concepto de meteorología espacial (*space weather*) que se maneja desde los años 90 para referirse al estudio de los efectos que se producen por la interacción del viento solar, el campo magnético terrestre y la radiación ionizante circundante a la Tierra, y cómo esto afecta a nuestro entorno tecnológico y de vida, ya sea en la superficie, en una aeronave o en órbita. Para aumentar la fiabilidad de las simulaciones del entorno de radiación de una misión espacial y mejorar así la predicción de los niveles de radiación esperados, es necesario crear nuevos modelos de radiación que describan el *space weather* o actualizar los existentes, y para eso es necesario medir de forma sistemática la radiación en las misiones espaciales.

En ocasiones, como la radiación afecta a todos los sistemas embarcados, la radiación que reciben ciertos instrumentos de un vehículo espacial tiene que ser medida para corregir los datos tomados por los sensores que se degradan por la acción de la radiación a lo largo de la misión. En este sentido, conseguir monitores pequeños, de muy bajo consumo eléctrico y coste reducido, se convierte en un hito tecnológico de las misiones científicas en donde la degradación de sus instrumentos principales tiene que ser compensada con una medida directa de la radiación recibida. Actualmente ya hay diversos sensores pequeños y de coste y consumo moderados para medir la llamada “Dosis de Ionización” (TID – *Total Ionizing Dose*). Sin embargo, las tecnologías de medida de la “Dosis de Desplazamiento” (TNID – *Total Non-Ionizing Dose*), siendo igual de importantes, no han alcanzado el mismo grado de madurez. De hecho, en los



dispositivos optoelectrónicos lo es más importante es evaluar la TNID recibida ya que se ven poco afectados por la TID.

Dentro de este marco, este trabajo de tesis doctoral ha sido desarrollado con los siguientes objetivos:

- Evaluación de dispositivos COTS de tipo fotodiodo y LED para su uso en misiones espaciales.
- Puesta en marcha de un sensor de Daños por Desplazamiento (DD) de diseño propio denominado "Unidades optoeLectrónicAS para un DOSímeTrO y espectRómetRo ESpatial " Las Dos Torres (LDT).
- Explotación de LDT a bordo del satélite NANOSAT-1B (NANOSAT) para verificar su funcionamiento y compararlo con otros sensores y las simulaciones que resultan de emplear los modelos de radiación.
- El desarrollo y explotación de LDT ha tenido varios fines:
  - Probar nuevas tecnologías para la determinación de los DD en órbita, y seleccionar las más adecuadas en relación a facilidad de uso y baja utilización de recursos.
  - Hacer de precursor para el monitor *The Two Towers*, evolución de LDT, y que fue seleccionado como carga científica secundaria del satélite de observación de la tierra SEOSAT/INGENIO.
  - Construcción de un mapa de radiación de los protones atrapados de la órbita del NANOSAT que podría usarse para calcular la radiación recibida por otros satélites con órbitas similares.
- Aumentar el *nivel de madurez tecnológica* (TRL – *Technology Readiness Level*) de un nuevo sensor de DD para su uso recurrente en todo tipo de misiones espaciales que requieran monitorizar esta clase de daños.

## Resumen

---

Título: *Desarrollo de Las Dos Torres: monitor de protones de base optoelectrónica para uso espacial. Primeros datos en órbita LEO a bordo del satélite NANOSAT – 1B*

En este trabajo de tesis doctoral se presentan el desarrollo, la calibración y los primeros resultados en vuelo, a bordo del satélite NANOSAT-1B, de las "Unidades optoeLectrónicaS para un DOSímeTro y espectRómetRo ESpatial" (Las Dos Torres – LDT).

LDT es un monitor de radiación de base optoelectrónica, sensible a los daños por desplazamiento (DD) que producen algunas partículas energéticas (como los protones), y sensible a los efectos transitorios que producen las radiaciones ionizantes (como rayos gamma, electrones o los propios protones). LDT utiliza dos dispositivos comerciales (COTS – *Commercial Off-The-Shelf*) optoelectrónicos, un LED y un fotodiodo, como elementos sensibles a la radiación. En concreto, LDT tien tres modos de trabajo, que coinciden con las tres medidas que realiza para caracterizar el entorno de radiación. Las tresmedidas que realiza son: (1) la degradación de la potencia óptica del LED que es proporcional a los DD inducidos por la radiación; (2) la señal de ionización directa que es proporcional al flujo de partículas ionizantes (como los  $p^+$ ); y (3) el aumento de la corriente de oscuridad que es también proporcional a los DD. Con este último modo de trabajo se ha conseguido resolver los problemas asociados al *annealing*. Resolver los problemas con el *annealing* ha permitido desarrollar un nuevo sensor de DD de reducida masa y consumo eléctrico, que es capaz de integrar todo el daño recibido incluso estando apagado, tomando ventaja además de su uso activo como monitor de flujo en tiempo real.

NANOSAT-1B es un satélite desarrollado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que fue inyectado en una órbita baja (LEO – *Low Earth Orbit*) polar en julio de 2009.

Combinando los tres modos de trabajo LDT puede medir de forma directa la dosis total de desplazamiento (TNID – *Total Non-Ionising Dose*) expresada como fluencia equivalente de protones, y el flujo equivalente de protones. Para verificar el correcto funcionamiento de los tres modos de medida, se han comparado los resultados entre ellos, se han comparado con los datos medidos por un dosímetro comercial tipo RadFET

embarcado en el NANOSAT-1B, se han comparado también con datos procedentes de monitores de radiación de otros satélites y, finalmente, con simulaciones basadas en diferentes modelos teóricos del entorno de radiación de una órbita LEO.

Usando las medidas de los flujos equivalentes de protones se ha mapeado la Anomalía del Atlántico Sur (AAS) a diferentes alturas. Con los datos de estos mapas se ha construido un modelo experimental de la radiación de la órbita LEO de NANOSAT-1B que se ha denominado MOLPN (*Modelo Operativo Local de Protones atrapados de NANOSAT-1B*). Se ha encontrado que el MOLPN proporciona valores muy similares al modelo llamado PSB97. Con ayuda del MOLPN se describirá un método de detección de fluctuaciones del entorno de radiación producidas por *eventos* o *tormentas solares*.

Con todo este desarrollo se ha demostrado que el sensor basado en la corriente de oscuridad funciona correctamente, y es apto para medir los DD en órbita, tras aplicar ciertas correcciones basadas en su *annealing* que constituían un verdadero problema para la utilización de esta tecnología como sensor de radiación. Se ha conseguido elevar su madurez tecnológica hasta el máximo nivel (TRL 9). Este nuevo sensor de DD ha sido ya incluido en diferentes misiones de exploración del planeta Marte, en dos instrumentos que el INTA ha desarrollado para las misiones MetNet Precursor y Exomars 2016 y se espera que en Mars 2020, y quizá en Exomars 2018.

## Abstract

---

Title: *Development of LDT: proton monitor based on optoelectronic devices for use in space. First data from a Low Earth Orbit (LEO) on board of Nanosat-1B satellite*

This work shows the development, calibration and first in-flight results on board of NANOSAT-1B SATELLITE of the space radiation monitor called “Las Dos Torres – LDT” (*Unidades optoeLectrónicaS para un DOSímeTro y espectRómetRo Espacial*).

LDT is a radiation monitor sensitive to the displacement damage (DD) produced by some energetic particles (like protons) in different optoelectronic detectors, as well as to non-cumulative effects produced by ionizing radiation (like gamma rays, electrons or protons). LDT uses two types of commercial optoelectronic devices (COTS - Commercial Off-The-Shelf), a Light-Emitting-Diode (LED) and a photodiode, as radiation-sensitive elements. Concretely, LDT allows the characterization of the radiation environment by measuring: (1) the degradation of the power emitted by the LED which is proportional to the DD induced by radiation; (2) the instantaneous ionization current generated in the photodiodes which is related to the flux of ionizing-particles (mainly protons for the NANOSAT orbit) crossing the detector at that moment; and (3) a measurement of the dark current of the photodiodes which is proportional to the DD induced by the radiation. The annealing effects affecting the last type of measurement have been compensated, so the device can measure the DD even when it is turned off.

NANOSAT-1B is a satellite developed by the National Institute for Aerospace Technology (INTA), which was launched into a polar Low Earth Orbit (LEO) in July 2009.

Combining its three working modes, LDT can directly measure the total displacement dose (TNID - Total Non-Ionising Dose) expressed as the equivalent fluence of protons, and the equivalent proton flux in real time. To verify the correct operation of the three measurement modes, we have compared the results obtained with each of other, and also with the data measured by a RadFET-type dosimeter that was also integrated in NANOSAT-1B. Finally, the results have also been compared with data from other radiation monitors, and with simulations based on different theoretical radiation models of the LEO orbit environment.

The South Atlantic Anomaly (SAA) has been mapped using the measurement of the equivalent proton flux at different heights. An experimental model describing the time and space dependence of the proton flux of the orbit of NANOSAT-1B, has been derived from all those measurements. It has been called MOLPN (*Modelo Operativo Local de Protones atrapados de NANOSAT-1B* – Local Operative Model for Trapped Protons of the orbit of NANOSAT-1B). It has been found that the MOLPN provides very similar values to the PSB97 model. A method for detecting radiation environment fluctuations caused by solar events using the MOLPN, has also been described.

This development has finally shown that the annealing effects can be corrected and so the new sensor based on the measurement of the increment in the photodiodes dark current, is suitable for measuring the DD. With the described developments, the maximum Technology Readiness Level (TRL 9) has been reached. This DD sensor is going to be used within several instruments that INTA develops for different Mars exploration missions such as Mars MetNet Precursor, Exomars 2016, Mars 2020, and Exomars 2018.

## Estructura de la tesis

---

Para describir y explicar todos los puntos del desarrollo, calibración y explotación de LDT, este trabajo de tesis se ha dividido en un total de 7 capítulos y 3 apéndices:

**Capítulo 1 – Introducción.** Se describen diferentes aspectos generales relacionados con el entorno espacial en el que se ve inmerso un instrumento durante una misión, y en particular el entorno de radiación, y los efectos que produce sobre dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.

Se analiza la influencia que tienen el Sol y el campo magnético terrestre (los cinturones de Van Allen y la AAS) sobre el entorno de radiación. También se introducen los modelos existentes para la estimación de este entorno de radiación en las órbitas alrededor de la Tierra.

Se definen igualmente las magnitudes comúnmente usadas para cuantificar la radiación recibida y los efectos generados sobre materiales y dispositivos, y los conceptos para su cálculo o estimación.

Por último se describe la filosofía de desarrollo de una nueva tecnología para uso espacial según una métrica definida por la NASA, el llamado nivel de madurez tecnológica (TRL – *Technologic Reliability Level*), en donde TRL-1 es la concepción de la idea, y el TRL-9 es la demostración de su funcionamiento en una misión real. Se indicará, en las conclusiones del trabajo de tesis, el nivel de madurez alcanzado por LDT y por sus modos y tecnologías de medida.

**Capítulo 2 – LDT: un monitor de radiación.** Describe el principio de funcionamiento de LDT, el cual está basado en los efectos macroscópicos medibles de la incidencia de protones sobre un LED y sobre un fotodiodo, y en los cambios que producen ciertos espesores de aluminio usados como blindaje junto con una geometría en forma de torre. En este capítulo se describen también los ensayos realizados sobre un prototipo construido para verificar el principio de funcionamiento, ensayos que, aunque se realizaron después de la selección de componentes descrita en el capítulo 4, se describen aquí para sentar las bases de LDT.

**Capítulo 3 – Técnicas experimentales para los ensayos de radiación.** Se describen algunas particularidades de los sistemas experimentales y técnicas de

irradiación utilizadas para irradiar los dispositivos, prototipos y modelos de LDT, en las diferentes etapas del desarrollo del instrumento. Todos los montajes opto-mecánicos (OGSE – *Optical Ground Support Equipment*), aplicaciones informáticas (EGSE – *Electronic Ground Support Equipment*) de adquisición, control y análisis, que han tenido que ser desarrollados *ad hoc*, se describen aquí. Las principales características de las instalaciones de irradiación que se han usado y han condicionado estos montajes experimentales, procedimientos de ejecución o incertidumbre en los resultados también se detallan.

**Capítulo 4 – Los dispositivos sensores de radiación de LDT.** Se discute sobre la selección de los elementos sensores de radiación de LDT. Esta selección se basa en las irradiaciones de selección de componentes comerciales (COTS) optoelectrónicos (LED y fotodiodos) para un sistema totalmente distinto a LDT, un sistema de comunicaciones óptico inalámbrico para el interior del satélite (OWLS – **O**ptical **W**ireless **L**ink intra-Satellite communication). Durante estas irradiaciones se probaron más de un centenar de dispositivos. En este capítulo se muestran los resultados y las conclusiones que aplican a LDT.

En una segunda parte, de este capítulo, se muestran los resultados de las irradiaciones de caracterización de los candidatos seleccionados: el L9338 (LED) y el S5107 (fotodiodo), ambos de *Hamamatsu*<sup>®</sup>. Durante esta sección se describe, entre otros puntos, la solución adoptada para uno de los principales problemas que surgen al usar la corriente de oscuridad como magnitud para medir los DD: la recuperación natural o *annealing*.

**Capítulo 5 – Diseño de LDT.** Describe los ensayos, cálculos y simulaciones realizados para definir y especificar todas las características de LDT que afectan a la medida de la radiación: características del diseño mecánico referidas a tamaños y espesores de ciertos blindajes para mejorar la respuesta, reflectividad óptica del interior de LDT, rangos dinámicos y precisión necesaria en el sistema electrónico de adquisición, así como la secuencia de adquisición para mejorar la precisión del instrumento en vuelo.

**Capítulo 6 – Calibración de LDT.** Describe y muestra los resultados de la calibración de LDT con protones. Se muestran las conclusiones de la pre-calibración del modelo de calificación (QM – *Qualification Model*) con el que se consiguió un TRL 8.

También se describe la ejecución de la calibración térmica y sus resultados. Se atiende tanto a aspectos experimentales, como prácticos y de análisis.

**Capítulo 7 – Preparación de la explotación de LDT.** Se presentan las características particulares de la órbita del NANSOAT-1B y de su entorno de radiación. Se establecen y discuten, en base a esas características, los diferentes modos de activación de LDT durante la explotación.

Se explica el procedimiento seguido en el tratamiento de los datos descargados para que queden listos para el análisis. Se presta especial atención a las calibraciones térmicas que se realizan en vuelo para la corrección en temperatura de las señales, y la separación de los efectos de DD y de ionización.

**Capítulo 8 – Explotación – Resultados en órbita.** Se describen los métodos de análisis para el cálculo de los resultados en órbita. Se muestran, discuten y comparan estos resultados entre sí, con monitores de referencia y con simulaciones.

**Capítulo 9 – Trabajos futuros y conclusiones.** Se indican los trabajos realizados durante el desarrollo de LDT. Se exponen las conclusiones generales de este trabajo de tesis. Se discuten los trabajos futuros que quedan abiertos tanto en la línea de análisis de los datos de LDT, como en los futuros (o actuales) desarrollos del monitor de radiación TTT (*The Two Towers*) del proyecto SEOSAT / INGENIO, y el uso del sensor de corriente de oscuridad adaptado para la determinación de DD, que ha sido incluido en los diferentes modelos del Sensor de Irradiancia Solar (SIS) de las distintas misiones de exploración del planeta Marte, en las que el INTA ha participado: MetNet Precursor, Exomars2016 y Mars 2020, y quizá también en Exomars 2018.

También se listan las publicaciones realizadas por el doctorando, incluyendo algunos índices bibliométricos de la producción científica de las publicaciones del doctorando.

**Apéndice A – Procedimiento de calibración de LDT.** Se detallan los pasos y condiciones específicas del procedimiento de calibración de LDT: energías de los protones usados, fluencias, flujos y orden de ejecución de los distintos pasos.

**Apéndice B – Planos y diagramas de bloques de LDT.** Se adjuntan los principales planos y diagramas de bloques del instrumento.



**Apéndice C – TMP36.** Se discuten los resultados relativos a los efectos que la radiación genera en los sensores de temperatura de LDT, llegando a la conclusión de que son despreciables en esta aplicación.

**Apéndice D – Matrices de resultados de la calibración de LDT.** Se adjuntan todas las matrices de resultados de la calibración del modelo FM de LDT, incluyendo factores de daño, sensibilidades y los errores estadísticos de todos los sensores de LDT: S5107 (fotodiodo), L9338 (LED) y TMP-36 (sensor de temperatura).

## Lista de acrónimos

---

<b>AAS:</b>	<i>Anomalía del Atlántico Sur</i>	<b>GCR:</b>	<i>Galactic Cosmic Rays</i>
<b>ACS:</b>	<i>Attitude Control System</i>	<b>GOES:</b>	<i>Geostationay Operational Environmental Satellite</i>
<b>AFRL:</b>	<i>Air Force Research Laboratory</i>	<b>IKI:</b>	<i>Academia de Ciencias Rusa</i>
<b>CAB:</b>	<i>Centro de AstroBiología</i>	<b>INTA:</b>	<i>Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial</i>
<b>CDS:</b>	<i>Caracterización de los Dispositivos Sensores seleccionados</i>	<b>ISS:</b>	<i>International Space Station</i>
<b>CME:</b>	<i>Coronal Mass Ejection</i>	<b>JCR:</b>	<i>Journal Citation Report ®</i>
<b>COTS:</b>	<i>Comercial Off-The-Shelf</i>	<b>LA:</b>	<i>Lavochkin Association</i>
<b>CRRES:</b>	<i>Combined Released and Radiation Effects Stallite</i>	<b>Las Dos Torres:</b>	<i>Unidades optoeLectrónicaS para un DOSímeTrO y espectRómetRo Espacial</i>
<b>DAQ:</b>	<i>Data AdQuisition</i>	<b>LATRM:</b>	<i>Low Altitude Trapped Radiation Model</i>
<b>DD:</b>	<i>Daños por Desplazamiento</i>	<b>LDT:</b>	<i>Las Dos Torres</i>
<b>DDD:</b>	<i>Dosis de Daños por Desplazamiento</i>	<b>LED:</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>DREAMS:</b>	<i>Dust characterisation, Risk assessment, and Environment Analyser on the Martian Surface</i>	<b>LEO:</b>	<i>Low Earth Orbit</i>
<b>EDM:</b>	<i>Entry, Descent and landing demonstrator Module</i>	<b>LET:</b>	<i>Linear Energy Transfer</i>
<b>EGSE:</b>	<i>Electronic Ground Support Equipment</i>	<b>MEDA:</b>	<i>Mars Environmental Dynamics Analyzer</i>
<b>ELDRS:</b>	<i>Enhanced Low Dose-Rate Sensitivity</i>	<b>MEGSE:</b>	<i>MEchanical Ground Support Equipment</i>
<b>ESA:</b>	<i>European Space Agency</i>	<b>MMPM:</b>	<i>Mars Metnet Precursor Mision</i>
<b>FECYT:</b>	<i>Fundación Española para la Ciencia y Tecnología</i>	<b>MNL:</b>	<i>MenNet Lander</i>
<b>FM:</b>	<i>Flight Model</i>	<b>MNT:</b>	<i>Micro/Nano-Tecnologías</i>
<b>FMI:</b>	<i>Finnish Meteorological Institute</i>	<b>MOLPN:</b>	<i>Modelo Operativo Local de Protones atrapados de NANOSAT-1B</i>
<b>FoV:</b>	<i>Field Of View</i>	<b>NIEL:</b>	<i>Non-Ionizing Energy Loss</i>
		<b>NIR:</b>	<i>Near Infrared</i>

<b>NOAA:</b>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>	<b>SET:</b>	<i>Single Even Transient</i>
<b>NWS:</b>	<i>National Weather Service</i>	<b>SEU:</b>	<i>Single Event Upset</i>
<b>OGSE:</b>	<i>Optical Ground Support Equipment</i>	<b>SIS:</b>	<i>Sensor de Irradiancia Solar</i>
<b>OWLS:</b>	<i>Optical Wireless Link intra-Satellite communication</i>	<b>SPE:</b>	<i>Solar Particle Event</i>
<b>PIF:</b>	<i>Proton Irradiation Facility</i>	<b>SPENVIS:</b>	<i>SPace ENVironmnt Information System</i>
<b>PCB:</b>	<i>Printed Circuit Board</i>	<b>STM:</b>	<i>STructural Model</i>
<b>PSI:</b>	<i>Paul Scherrer Institut</i>	<b>TGO:</b>	<i>Trace Gas Orbiter</i>
<b>PIPS:</b>	<i>Passivated Implanted Planar Silicon</i>	<b>TID:</b>	<i>Total Ionizing Dose</i>
<b>QM:</b>	<i>Qualification Model</i>	<b>TLE:</b>	<i>Two Line Element</i>
<b>RadFET:</b>	<i>RADIation-sensing Field-Effect Transistor</i>	<b>TMP-1:</b>	<i>Trapped Model Proton</i>
<b>RDS:</b>	<i>Radiation and Dust Sensor</i>	<b>TNID:</b>	<i>Total Non-Ionizing Dose</i>
<b>Roscosmos:</b>	<i>Agencia Espacial Federal Rusa (Роскосмос)</i>	<b>TRL:</b>	<i>Technology Readiness Level</i>
<b>RPL:</b>	<i>Laboratorio de Radio Física de la USC – Radiation Physics Laboratory</i>	<b>TTT:</b>	<i>The Two Towers</i>
<b>RTG:</b>	<i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i>	<b>UCM:</b>	<i>Universidad Complutense de Madrid</i>
<b>SDS:</b>	<i>Selección Dispositivos Sensores</i>	<b>USC:</b>	<i>Universidad de Santiago de Compostela</i>
<b>SEE:</b>	<i>Single Event Effect</i>	<b>UTC:</b>	<i>Tiempo Universal Coordinado</i>
<b>SEL:</b>	<i>Single Event Latchup</i>	<b>UV:</b>	<i>UltraVioleta</i>
		<b>VPF:</b>	<i>Verificación del Principio de Funcionamiento</i>
		<b>WOS:</b>	<i>Web of Science</i>





## 1 INTRODUCCIÓN

*Se introducen aspectos generales del ambiente espacial y sus efectos sobre dispositivos y materiales. Se revisa cómo afecta el entorno de radiación a los dispositivos electrónicos y optoelectrónicos. Se explican conceptos de la interacción radiación-materia distinguiendo entre los procesos de daños por ionización y por desplazamiento. Se presentan las magnitudes y unidades comúnmente usadas para medir la radiación, y se indica cuáles de ellas son usadas en este trabajo de tesis. Se introduce el concepto de “madurez tecnológica” y se describe la métrica definida por la NASA para cuantificarlo. Esta métrica se aplicará al desarrollo de LDT y sus modos de medida.*

El origen de LDT fue los ensayos de radiación realizados para el estudio de la degradación de fotodiodos y LED dentro del marco del desarrollo de un sistema de Comunicaciones Ópticas Difusas para el interior del satélite (*Optical Wireless Links for intra-Satellite communication* – OWLS) [Arr09], [Tam10], [Rod08], [Gue07] y [Gue06].

Los OWLS fueron el resultado de un estudio realizado por la División de Ciencias del Espacio del INTA para la Agencia Europea del Espacio (ESA) (12681/97/NL/MV) que abordaba el asentamiento de las Micro/Nano-Tecnologías (MNT) en el Espacio. Esta idea que fue presentada en [Gue99], ofrecía una solución de comunicación óptica entre los microsistemas de nanosatélites modulares, reduciendo el peso, facilitando la modularidad, y simplificando el proceso de integración.

El proyecto OWLS se desarrolló entre 1999 y el año 2000 gracias a la financiación parcial de la ESA (ESTEC/13784/99/NL/MV). El equipo de trabajo fue liderado por el INTA, con la UPM (ETSI de Telecomunicación) y el CSIC (CNM de Barcelona) como subcontratistas. Terminó con la realización de unos informes y de un demostrador que pusieron de manifiesto, entre otras cosas, que “*las tecnologías involucradas en la incorporación de este avance [OWLS] en los satélites futuros estarían principalmente basadas en la utilización de componentes optoelectrónicos comerciales (COTS – Commercial-Off-The-Shelf) de primera ventana (~ 850 nm)*”. En la actualidad ha habido varios experimentos en tierra y en órbita y ha sido usado como sistema de comunicaciones para dar soporte en algunas misiones [Arr09] [Arr11].

Durante los ensayos de radiación de los componentes de OWLS se observó que la degradación de algunas características podía ser usada para medir la dosis de desplazamiento producida por el ambiente de radiación en una misión espacial. En esta introducción se va a describir cual es el ambiente del entorno espacial centrándose en el de radiación y en los modelos existentes para su estimación (§1.1). Se explica también cómo afecta la radiación a los componentes electrónicos (§1.2), que magnitudes se manejan y como se cuantifica la radiación y sus efectos (§1.3). Y por último, como en este trabajo de tesis se aborda el desarrollo de un nuevo sensor de daños por desplazamiento, se describen las etapas del estado de desarrollo de LDT en base a la escala del *nivel de madurez tecnológica* (TRL – *Technology Readiness Level*) (§1.4).

## 1.1 Condiciones ambientales del entorno espacial

El entorno de una misión espacial es el conjunto de condiciones ambientales que afectaran a una misión a lo largo de su vida operativa. Este comprende una parte terrestre relativa principalmente al lanzamiento, otra propiamente espacial, y finalmente, si es el caso, otra correspondiente a la reentrada atmosférica y aterrizaje. Las condiciones ambientales de estos entornos deben de ser conocidas y tenidas en cuenta en el diseño para garantizar el buen funcionamiento del vehículo espacial durante toda la misión, pues algunas de estas condiciones ambientales alteran y degradan el funcionamiento y las características de los instrumentos y sistemas embarcados, disminuyendo la fiabilidad de los mismos [UPM1].

En este trabajo de tesis nos ocuparemos del entorno espacial, pues es donde se dan las condiciones de radiación que afectan a los componentes electrónicos y optoelectrónicos. Pero en el espacio hay más condicionantes que afectan a las misiones:

- **Vibración e impacto:** la misión puede verse truncada en el mismo momento del lanzamiento debido a las altas vibraciones a las que se ve sometida. El uso de actuadores pirotécnicos o sistemas de aterrizaje basados en airbag o penetradores, como en el caso de la “*Mars MEtNet Precursor Mission*” ([www\_MetNet], [Arr10]), incrementan la dureza de este entorno. Otro momento en el que las vibraciones toman un valor crítico es en la reentrada en atmósfera.
- **Ultra alto Vacío:** es una de las principales características del entorno espacial. Esto provoca que los componentes volátiles de los materiales se evaporen (fenómeno conocido como “desgasificación”), lo cual puede producir un cambio de las propiedades del material que *desgasifica* o en el comportamiento de otros sistemas, si son sensibles a la deposición de estos elementos volátiles. Bajo este aspecto, se debe tener cuidado con el cambio de propiedades ópticas de elementos ópticos, en los cuales una deposición de una fina capa de un contaminante puede llegar a provocar cambios drásticos de su transmitancia.

El vacío también produce alteraciones en procesos físicos relacionados con:

- **La transferencia de calor:** no existe convección, así la radiación térmica juega un papel principal. Esto provoca un gran salto térmico entre la parte de la nave que mira al sol (5780 K) frente a la que mira al espacio abierto (4 K).



Por ello se vuelve crítica la potencia disipada por los componentes electrónicos, los cuales pueden llegar a quemarse por falta de refrigeración.

- La **constante dieléctrica** del medio.
- El **rozamiento del medio con el vehículo espacial**: en el caso de órbitas bajas (LEO) donde el vacío es "menor", aparece un efecto de rozamiento, una fuerza de arrastre, que frena el satélite y produce la **perdida de altura**, que debe de

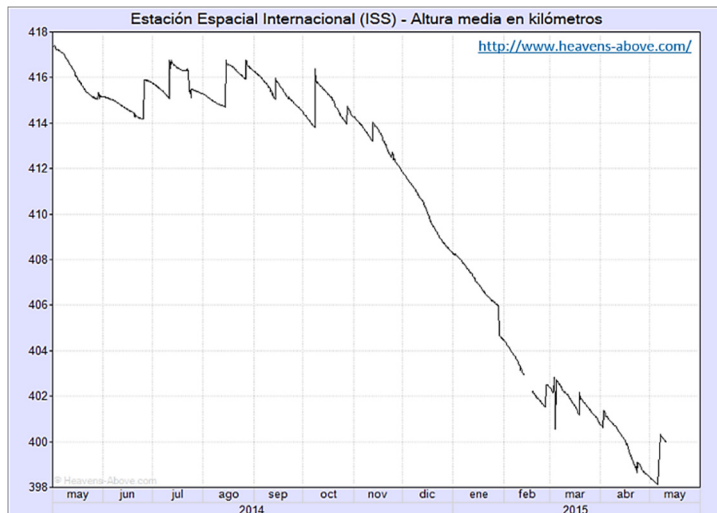


Fig. 1-1. Altura de la ISS [www\_Hea]. En el eje x se representa la fecha, y en el eje y la altura expresada en km

ser compensada por medio del uso de propulsores. La Fig. 1-1 muestra la altura de la Estación Espacial Internacional (ISS – *International Space Station*), en la que se aprecia la pérdida de altura progresiva, y los picos de elevación producidos por el uso de su sistema de propulsión.

- **Micro-gravedad**: la gravedad aparente que se experimenta en órbita oscila entre  $10^{-3}$  y  $10^{-11}$  g<sup>1</sup>. Esto afecta a reacciones químicas y procesos biológicos. Es el efecto más notable en las misiones tripuladas.
- **Micro-meteoritos y basura espacial**: afectan a la cubierta externa, incluidos los paneles fotovoltaicos del exterior, los cuales deben ser resistentes a impactos de micrometeoritos de hasta 1μm de diámetro.
- **Campo magnético terrestre**: el campo magnético tiene una gran influencia sobre el entorno de radiación. Es un escudo protector, que tiene la contrapartida de generar zonas de alta concentración de radiación (los cinturones de *Van Allen*). Como curiosidad indicar que las auroras boreales se forman por la interacción de las partículas desviadas por el campo magnético con la atmosfera en las regiones polares.

<sup>1</sup> Las unidades de la gravedad en el S.I son m·s<sup>-2</sup>, pero es habitual expresarlo en “g”. Donde 1 g es la gravedad terrestre (~9,8 m·s<sup>-2</sup>).

- **Radiación espacial:** la radiación espacial afecta a todos los dispositivos electrónicos, y a la mayoría de los elementos de un sistema espacial modificando incluso las propiedades ópticas de los sistemas ópticos. En dosis muy altas incluso afecta a elementos estructurales como pueden ser las resinas epoxi. La dosis recibida dependerá de la duración de la misión, la órbita, del ciclo de actividad solar y de fenómenos aleatorios relacionados principalmente con las tormentas solares. Es importante estudiar y medir de forma sistemática los niveles de radiación en el espacio para mejorar los modelos teóricos existentes sobre el ambiente de radiación y así poder predecir, de forma cada vez más exacta, sus fluctuaciones y niveles. El estudio de los efectos que se producen en la interacción entre el viento solar, el campo magnético terrestre y la radiación ionizante circundante a la Tierra y como esto afecta, o puede afectar, a nuestro entorno tecnológico y de vida es lo que se denomina Meteorología Espacial (*Space Weather*).

El entorno de radiación y el térmico son los que más condicionan el diseño electrónico. En la Fig. 1-2 se muestra una representación muy simplificada de los intervalos térmicos y de radiación a los que se vería sometido un vehículo espacial que explorase algunos cuerpos del Sistema Solar. Se señalan igualmente algunas de las condiciones extremas presentes en las misiones espaciales.

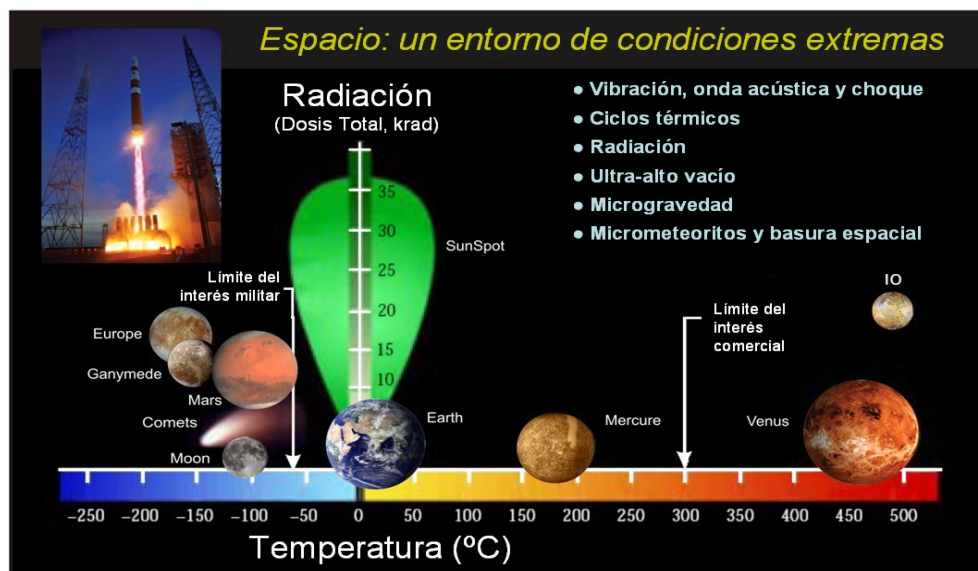


Fig. 1-2. Resumen del entorno de radiación y térmico en las misiones de exploración planetaria de algunos astros del Sistema Solar

Una vez repasadas algunas de las características del entorno espacial pasaremos a centrarnos en la radiación y sus efectos.

### 1.1.1 El entorno de radiación

La radiación, según la RAE, es “*la energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan por el espacio*”.

Hay varios criterios para dividir los diferentes tipos de radiación. Atendiendo a su naturaleza podemos distinguir: la radiación electromagnética y la radiación corpuscular.

Atendiendo a la cantidad de energía y su interacción con la materia, se establecen dos grandes grupos:

- Radiación No-Ionizante. Radiación con energía insuficiente para ionizar la materia. No la consideramos en el marco de la tesis.
- Radiación Ionizante. Radiación con energía suficiente para producir procesos de ionización en el medio que atraviesa. La radiación ionizante, como veremos, provoca dos tipos de efectos: los de ionización y los daños por desplazamiento<sup>2</sup>.

En la naturaleza se pueden encontrar una gran variedad de ondas electromagnéticas y partículas que provocan los mencionados efectos de ionización, de daños por desplazamiento o, en muchas ocasiones, ambos a la vez. Algunas de estas radiaciones son: rayos gamma ( $\gamma$ ), rayos X, electrones ( $e^-$ ), protones ( $p^+$ ), neutrones ( $n^0$ ), partículas beta ( $\beta$ ), partículas alfa ( $\alpha$ ) e iones y átomos de núcleos más pesados.

El entorno de radiación espacial está compuesto por una variedad de partículas energéticas (principalmente de  $e^-$ ,  $p^+$ , iones pesados y neutrones) con energías comprendidas entre los keV y los GeV. Estas partículas pueden estar, o atrapadas en el campo magnético terrestre, o atravesando el sistema solar.

La radiación que se puede encontrar en torno a la Tierra y que afectará a los dispositivos proviene de cinco fuentes claramente diferenciadas: radiación atrapada (cinturones de Van Allen), partículas solares (SPE – *Solar particle events*), rayos cósmicos, plasma de radiación, y partículas creadas por el hombre. A continuación se comentarán algunas particularidades:

---

<sup>2</sup> También conocidos en la bibliografía como efectos “no-ionizantes”. Por la confusión que puede haber con la radiación “no-ionizante” aquí no lo usaremos.

## A. Partículas Solares

El Sol expulsa continuamente material desde su superficie. Este flujo constante de partículas se conoce como viento solar, que es un plasma formado por partículas cargadas (principalmente  $p^+$ ) con un campo magnético asociado.

Otro fenómeno que se produce en el Sol son los “eventos solares de partículas” (*Solar Particle Events* – SPE) comúnmente conocidos como “tormentas solares”, cuyo origen es bastante complejo. Están asociados con dos fenómenos altamente violentos y energéticos: las llamaradas o fulguraciones solares (*solar flares*) y las eyecciones de masa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*). Los SPE son partículas de alta energía, entre 1 MeV y 1 GeV. Son en su mayoría  $p^+$ , pero también se encuentran partículas alfa y algunos núcleos pesados. Los eventos solares son más frecuentes, energéticos, intensos y duraderos en los periodos de alta actividad solar. No todas las fulguraciones y CME llegan a afectar a la Tierra, depende de la zona del Sol en la que se generen y la trayectoria que sigan. Se ha observado que alcanzan el entorno terrestre entre 1 y 2 SPE de intensidad “extrema” cada ciclo solar, el cual dura 11 años. La duración de un SPE oscila entre 1 y 5 días. El campo magnético terrestre hace de pantalla a este tipo de partículas desviándolas hacia los polos, no viéndose afectados los satélites de órbita baja (LEO) y con poca inclinación.

## B. Radiación atrapada – Cinturones de Van Allen y la AAS

Las partículas cargadas al aproximarse al dipolo magnético de la Tierra sufren la fuerza de Lorentz, dependiendo de su energía y trayectoria pueden ser deflecionadas, o bien quedar atrapadas en las líneas de campo magnético. Si quedan atrapadas, siguen las líneas de campo en una trayectoria helicoidal en dirección a los polos magnéticos. Como las líneas de campo de un dipolo magnético se concentran en las zonas polares, la fuerza de Lorentz que se ejerce sobre estas partículas siguiendo este tipo de trayectoria produce una “repulsión” que hace que la partícula “rebote” en dirección contraria hacia el otro polo magnético, donde vuelve a “rebotar”, y así indefinidamente. Los puntos donde las partículas “rebotan” se llaman “puntos espejo”. En la Fig. 1-3 se muestra una representación esquemática simplificada de una de estas trayectorias helicoidales. Este efecto, producto de la fuerza de Lorentz, provoca dos zonas de alta concentración de  $e^-$  y  $p^+$  de energías superiores a 30 keV distribuidas según dos toroides, uno interior y otro exterior centrado en el plano ecuatorial magnético, llamados cinturones de Van Allen. En

estos toroides también queda atrapada una pequeña concentración de iones pesados. En la Fig. 1-4 se representa la zona de mayor concentración de partículas en los cinturones interior y exterior.

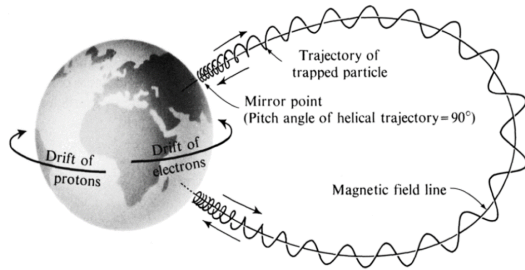


Fig. 1-3. Esquema de la trayectoria seguida por una partícula cargada en el entorno terrestre [Hes68]

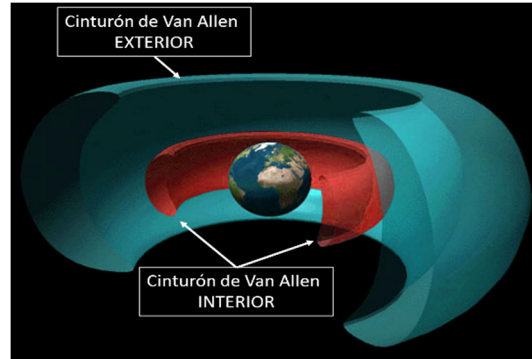


Fig. 1-4. Dibujo de los cinturones de Van Allen

En el anillo exterior solo encontramos  $e^-$  y se extiende desde los  $\sim 2,8$  a los  $\sim 12$  radios terrestres. En el anillo interior encontramos tanto  $e^-$  como  $p^+$ , generalmente se considera que se extiende entre los  $\sim 1,1$  y los  $\sim 2,4$  radios terrestres. En la Fig. 1-5 se muestra la distribución de  $e^-$  repartida entre ambos anillos, y en la Fig. 1-6 los  $p^+$  concentrados en el anillo interior.

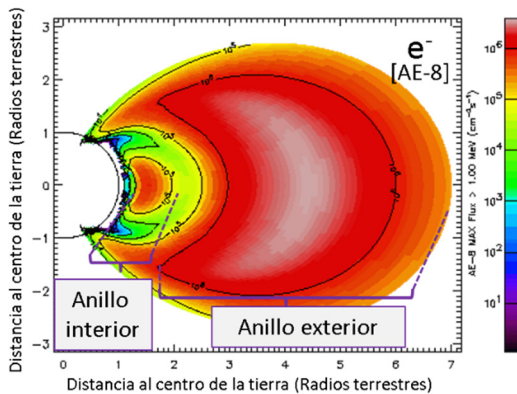


Fig. 1-5. Flujo integral de electrones de  $> 1$  MeV [SPENVIS]

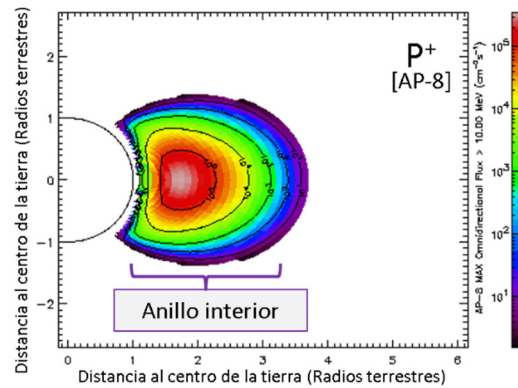


Fig. 1-6. Flujo integral de protones  $> 10$  MeV [SPENVIS]

El campo magnético terrestre, idealmente un dipolo perfecto, está deformado tanto por efectos externos como internos a la propia Tierra:

- **Efectos externos:** el viento solar deforma el campo magnético terrestre en las capas más alejadas de la Tierra (Fig. 1-7), produciendo que las líneas de campo se estiren o encojan en función de la actividad solar.

- **Efectos internos:** en la superficie de la Tierra existen anisotropías del campo magnético producidas por modificaciones de la composición de la corteza y el manto terrestre que producen dipolos locales que se suman a la contribución general. La placa del Atlántico Sur provoca la llamada Anomalía del Atlántico Sur – AAS. La Fig. 1-8 muestra el campo magnético terrestre medido a 650 km en el que se aprecia la AAS como una disminución del módulo del vector campo magnético [Mic10]. Esta deformación del campo magnético terrestre también deforma el anillo interior de los cinturones de Van Allen (Fig. 1-9).

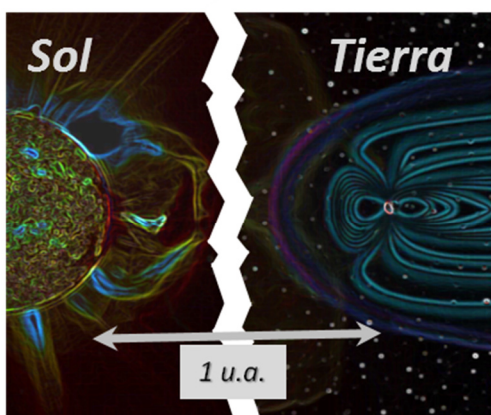


Fig. 1-7. Deformación del campo magnético terrestre por acción del viento solar

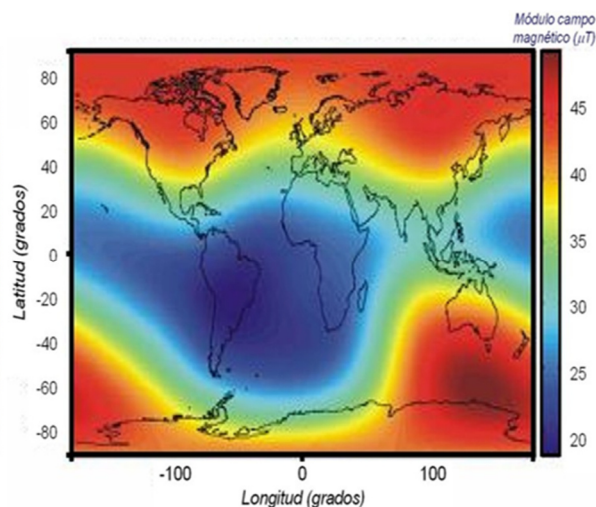


Fig. 1-8. Efecto de la AAS sobre el campo magnético terrestre en una órbita LEO de 650 km [Mic10]

El Sol, el viento solar y su ciclo de actividad, afectan de forma más evidente en las órbitas altas. Aunque se aprecian ciertas diferencias también en las órbitas bajas [Cer11], estas son generalmente despreciables frente a la AAS. En la Fig. 1-10 y la Fig. 1-11 se muestra

el efecto de la AAS en una órbita de 500 km de altura, la cual no recibe radiación fuera del área de la AAS. En este tipo de órbitas, la radiación atrapada es la principal fuente de radiación. Los protones solares solo llegan a afectar en la zona de los polos, o deformando la AAS ligeramente, durante “eventos solares” muy violentos.



Fig. 1-9. Representación de la deformación del anillo interior sobre la AAS



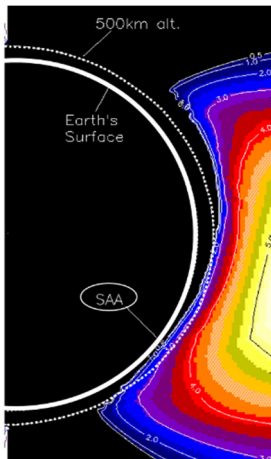


Fig. 1-10. Flujo integral de  $e^-$  de  $> 1$  MeV [SPENVIS]

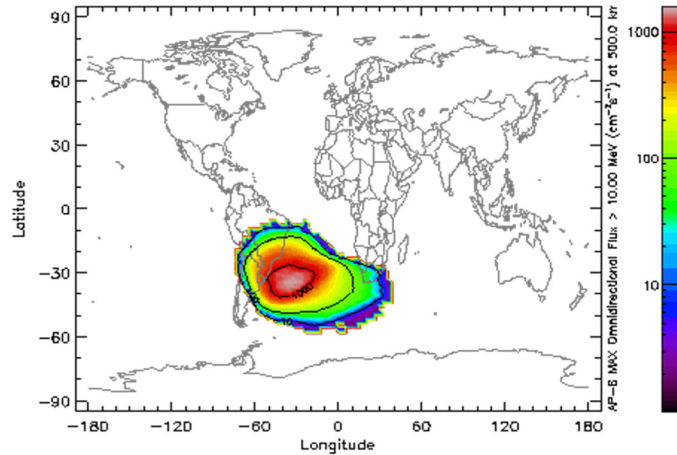


Fig. 1-11. Efecto de la AAS sobre el flujo integral de  $p^+$   $> 10$  MeV en una órbita de 500 km de altitud [SPENVIS]

### C. Rayos cósmicos Galácticos (GCR)

Los GCR son partículas de muy alta energía generadas en procesos extra solares, como supernovas. Tienen un flujo isotrópico de  $\sim 4$  partículas/cm<sup>2</sup>·s de núcleos ionizados con energías del orden de  $10^8$  -  $10^9$  eV, compuestas por hidrogeno (85%), por helio (14%) e iones pesados (1%). Al igual que pasaba con los protones solares, el campo magnético terrestre actúa como un escudo desviando estas partículas hacia los polos o reflejándolas hacia el espacio exterior.

### D. Plasma de radiación

En el sistema solar hay un plasma de electrones y protones de baja energía ( $<100$  keV). En los cinturones de radiación atrapada estas partículas solo representan los extremos de baja energía. El plasma de protones y electrones está asociado con el viento solar. Su flujo puede ser considerable en las zonas exteriores de la magnetosfera y el espacio interplanetario.

Las partículas de baja energía son fácilmente apantalladas y por lo tanto solo pueden afectar a las superficies más externas de los satélites, esto es, a los materiales para el control térmico y las cubiertas de las células solares. El plasma de baja energía puede cargar eléctricamente los satélites afectando a la electrónica del interior. La interacción del plasma con los materiales estructurales externos de un vehículo espacial puede también producir radiación, denominada radiación secundaria, que también afectaría al interior.

La distribución espacial y temporal del plasma está también condicionada por el Sol y su ciclo de actividad.

## **E. Partículas creadas por el hombre**

La radiación que afecta a las misiones espaciales no es solo de origen natural sino que el hombre también genera radiación de diversas formas.

La radiación primaria de una explosión nuclear está formada por neutrones,  $e^-$ , partículas  $\alpha$ , fragmentos de fisión, rayos  $\gamma$  y rayos X. En el caso de producirse alguna de la suficiente intensidad, podría afectar severamente al funcionamiento de todo tipo de aeronaves, pero desde el año 63 en que se firmó el tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares, es un caso no contemplado en misiones de exploración.

La radiación artificial más común que afecta a los vehículos espaciales hoy en día está relacionada con el uso de fuentes de energía radioactivas embarcadas que afectan localmente al propio vehículo. Este tipo de fuentes de energía se usan en los casos en los que los paneles solares no son suficientes. Un ejemplo es el uso de RTG (*radioisotope thermoelectric generator* – generador termoeléctrico de radioisótopos) los cuales han sido usados en diversas misiones de exploración del sistema solar como en las naves *Pioneer 10* y *11*, las *Voyager 1* y *2*, *Galileo*, *Ulysses*, *Cassini*, *New Horizons* e incluso en experimentos lunares dejados por el *Apolo 12* y *Apolo 17*. Actualmente este tipo de dispositivos siguen usándose cuando no hay otras alternativas, como en los *Mars Exploration Rovers* que la NASA usa en el planeta Marte y que constituyen una fuente real de radiación que afecta el diseño de la misión.

### **1.1.2 Modelos de radiación – Estimación del entorno**

Para cuantificar el entorno de radiación de una misión existen diferentes modelos de la radiación espacial. Estos modelos están divididos en modelos de partículas atrapadas, modelos de GCR y modelos de SPE.

Los modelos de partículas atrapadas combinan la teoría del movimiento de estas partículas en el seno de un campo magnético, con las medidas experimentales. Siempre están ligados a un modelo de campo magnético. Originalmente se usaba el caso ideal del dipolo, pero actualmente están basados en modelos más realistas del campo magnético terrestre incluyendo tanto las deformaciones internas como las externas producidas por el viento solar.

La NASA desarrolló los primeros modelos para protones (AP) y para electrones (AE) en 1962. Desde 1991 la versión 8 de estos modelos (el AP-8 y el AE-8) es la



referencia mundial en el análisis del entorno de radiación espacial, a pesar de tres limitaciones importantes. Son modelos estáticos que solo representan flujos medios omnidireccionales. Únicamente simulan dos casos del ciclo solar, el caso de máxima actividad (**AP-8 Max** y **AE-8 Max**) y el caso de mínima actividad (**AP-8 Min** y **AE-8 Min**), no permitiendo situaciones intermedias. Y en ciertas condiciones de órbitas bajas subestiman los flujos reales de radiación.

Las nuevas versiones de estos modelos, el **AP-9** y el **AE-9**, en las que se han intentado corregir las deficiencias de la versión 8, todavía en evaluación, están ya disponibles y su uso es libre.

Otros modelos existentes son el modelo **CRRESPRO** (para  $p^+$ ) y el **CRRESELE** (para  $e^-$ ) desarrollados por AFRL (*Air Force Research Laboratory*) con datos recogidos durante 14 meses del máximo solar del ciclo 22, por el satélite CRRES (*Combined Released and Radiation Effects Stallite*). El modelo **SAMPEX/PET** o modelo **PSB97** que es específico para altitudes bajas en condiciones de mínimo solar elaborado con los datos recogidos en la misión SAMPEX. El modelo **LATRM** (*Low Altitude Trapped Radiation Model*) es un modelo de  $p^+$  para órbitas LEO desarrollado por Boeing con los datos recogidos durante 17 años por el satélite TIROS/NOAA. Su principal aportación sobre el AP-8 es que mide de forma continua las variaciones de los niveles de protones con el ciclo solar. El modelo **TMP-1** (*Trapped Model Proton*) combina características del LATRM y CRRESPRO, y cubre la región comprendida entre los 300 km de altitud y los 35.786 km de las órbitas GEO, pero solo abarca energías entre 1,5 y 81,5 MeV.

En este trabajo de tesis se ha desarrollado un modelo experimental que hemos llamado *Modelo Operativo Local de Protones Atrapados de NANOSAT-1B* (MOLPN). Este ha sido comparado con el AP8, con el CREESPRO y con el PSB97, y los resultados muestran que es muy similar al PSB97.

Los modelos para simular los protones solares son modelos estadísticos por la dificultad en la predicción de las SPE. Por este motivo su incertidumbre es alta. Algunos de estos modelos son el SOLPRO, el JPL-91, *The King model*, y el CREME96, entre otros.

El modelo CREME96 también simula el nivel de partículas de GCR, pero se considera más exacto el denominado CHIME para este tipo de partículas.

La radiación recibida durante una misión no solo depende de las fuentes de radiación simuladas por los modelos antes mencionados. Los siguientes factores afectan directamente a la cantidad total de radiación recibida:

- La **órbita** del satélite: la altitud, inclinación y excentricidad afecta a las zonas por las que el vehículo espacial orbita. Esto determina si atraviesa o no los cinturones de Van Allen, si pasa o no por los polos, o si sale de la protección del campo magnético terrestre. Es especialmente crítico definir bien la órbita en zonas donde la distribución espacial de la radiación no sea homogénea, como en los límites de los cinturones de Van Allen, especialmente en las órbitas bajas inferiores a 1.000 km.
- El **período en el que tenga lugar la misión** en relación al ciclo de actividad solar. Los fenómenos aleatorios (SPE, fulguraciones y CME) son más frecuentes e intensos durante el periodo de alta actividad solar, pero por el contrario, el viento solar protege de los rayos cósmicos. Dependiendo de si el sistema es más o menos sensible a un tipo de radiación o a otra, será más conveniente coincidir con un máximo de actividad solar o con un mínimo.
- Existencia de **fuentes radioactivas** en el propio vehículo espacial.
- El **apantallamiento** que tenga el vehículo espacial. La cantidad final de radiación recibida dependerá también de la protección externa de la nave espacial. En ocasiones 2 ó 3 mm de aluminio de apantallamiento pueden marcar una diferencia importante.
- La **duración de la misión** es directamente proporcional a la dosis de radiación acumulada.

## 1.2 Interacción radiación materia y efectos sobre componentes electrónicos

Cuando una partícula atraviesa un material e interacciona con él, pierde energía. Esta energía es absorbida por el material y produce alteraciones microscópicas que se reflejan en efectos macroscópicos observables en los dispositivos y los materiales. Esta interacción es producida por dos procesos diferentes:

- Procesos de **ionización**. Se dan cuando la interacción es con los electrones del medio generando pares electrón-hueco (e-h). Esto sucede tanto en materiales aislantes, como en semiconductores. En función de en qué zona se generen estos portadores de carga, y de si tienen movilidad o no, los efectos observables serán distintos. Por ejemplo, el oscurecimiento de algunos materiales transparentes se produce por la formación de los llamados centros de color, que se sabe que están producidos por efectos de ionización; también vuelven quebradizos algunos plásticos y resinas; y de forma general, afectan a todas las tecnologías electrónicas en mayor o en menor medida. ([Fle95], [Dre98],[Ler99])
- Procesos **no-ionizantes** o **daños por desplazamiento (DD)**. Se dan cuando la interacción de la radiación es con los átomos del medio, llegando a desplazarlos de su posición original. Solo tiene efecto en el caso de materiales cristalinos en los que los átomos están ordenados en una red tridimensional, ya que alteran la estructura cristalina del material afectando al funcionamiento del dispositivo en el que se emplean. Entre este tipo de materiales se encuentran nuevamente los semiconductores de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos. Como los defectos en la red del semiconductor afectan principalmente a los portadores minoritarios (a su tiempo de vida e incluso a su movilidad), solo se ven afectados los dispositivos que dependen de estos portadores como los LED, fotodiodos, láseres de diodo y células solares entre otros ([Sro88], [Sum92], [Mar99], [Sro13]).

En ocasiones estos cambios en las propiedades se buscan y aprovechan para mejorar algunas cualidades de materiales y dispositivos. Como por ejemplo el efecto que producen los “centros de color” en materiales transparentes se usa para colorear vidrios buscando un cambio estético (por ejemplo en el caso de algunas botellas de cerveza). Un

ejemplo con implicaciones más relevantes sería el dopado de semiconductores por implantación iónica para el desarrollo de dispositivos eléctricos. Otro ejemplo es el caso del instrumento que describe este trabajo de tesis, el cual utiliza los efectos observables que la radiación produce en ciertos dispositivos optoelectrónicas para medir cuanta radiación ha recibido dicho dispositivo.

En general, los ambientes de radiación, son una fuente de degradación que afecta, en mayor o menor medida, al conjunto de las misiones espaciales, incluyendo a la seguridad de los astronautas en las misiones tripuladas. Nos centraremos en el entorno y misiones espaciales por el contexto en el que estamos, pero es extensible a otros entornos donde exista radiación ionizante, tales como centro de investigación (aceleradores de partículas, fuentes de cobalto...), hospitales (terapias con partículas ionizantes...), centrales nucleares, etc. Un ejemplo reciente de las implicaciones de los efectos de las radiaciones ionizantes lo encontramos en el del accidente de Fukushima, donde los drones que se emplearon en tareas de reconocimiento del interior del núcleo tan solo estaban operativos durante unas pocas horas antes de dejar de funcionar a consecuencia de la radiación.

Generalmente la pérdida de energía se produce simultáneamente en procesos de ionización y de DD, pero la cantidad total de energía perdida por éstos últimos suele ser despreciable frente a la perdida por ionización. Sin embargo, en ocasiones, solo los DD producen un daño que afecta a las propiedades macroscópicas, pues la energía absorbida no siempre produce un efecto apreciable [Hol93].

Los efectos de la radiación sobre dispositivos electrónicos y optoelectrónicas son de diversos tipos ([Nat99], [Dres98], [Mar99], [Ono03], [Sro13]). Aquí se va a dar una clasificación general de los mismos y describir los conceptos básicos relacionados con el desarrollo y puesta en marcha de LDT, pues su funcionamiento se basa en algunos de ellos. Y aunque el desarrollo de este trabajo de tesis sigue un enfoque práctico, experimental y basado en los efectos macroscópicos externos observables y caracterizables, es importante el definir previamente algunos conceptos para poder avanzar en el análisis de resultados y la obtención de conclusiones.

En primer lugar los efectos de la radiación sobre dispositivos electrónicos se pueden clasificar en función del tiempo que permanece el efecto:

- **Efectos transitorios.** Cuando afectan únicamente durante el periodo de tiempo concreto en el que la radiación está interaccionando con el dispositivo.
- **Efectos permanentes.** Cuando su efecto perdura durante un tiempo indeterminado después de terminar la interacción de la radiación con el dispositivo. Estos efectos, que suelen producir un daño o degradación de las características de los dispositivos, puede perdurar de forma constante en el tiempo, sufrir una cierta tendencia recuperadora o incluso recuperarse del todo al estado original inicial después de un cierto tiempo. Esta recuperación puede ser natural y espontánea, o provocada por alguna acción concreta desde el exterior.

Los efectos también pueden clasificarse según la cantidad de partículas necesarias para producirlos:

- **Efectos acumulativos.** Los producen tanto los procesos de ionización como los de DD. La radiación provoca efectos microscópicos que van acumulándose poco a poco en el dispositivo. Estos efectos de manera individual no producen un resultado importante sobre las características del mismo, pero en su conjunto lo van degradando. Esta degradación puede llegar a inhabilitarlo completamente, o a dejarlo inservible solo para ciertas aplicaciones.
- **Efectos puntuales,** generalmente conocidos por *Single Event Effect (SEE)*, están provocados exclusivamente por procesos de ionización. Se habla de SEE cuando la incidencia de una única partícula sobre un dispositivo provoca un efecto macroscópico que puede llegar a provocar un fallo total de funcionamiento. Se diferencian dos categorías, los *soft errors* cuando no destruyen el dispositivo de forma permanente, y los *hard errors* cuando lo dejan inservible. Dentro de los *soft errors* encontramos: el **SEU** (*Single Event Upset*) el cual produce un cambio en un bit almacenado en una memoria digital; o el **SET** (*Single Even Transient*) en el que un evento ionizante produce una carga que en un circuito analógico es colectada a su salida provocando un pulso de corriente de duración y amplitud variable, y de consecuencias que

dependen de muchos factores. El ejemplo más común dentro de los *hard errors* es el *single event latchup* (SEL), o *latchup*, que se produce en circuitos digitales cuando, por la incidencia de una partícula ionizante, se produce un cortocircuito entre la alimentación y masa que se mantiene hasta que se desconecta o apaga el dispositivo, si no se hace a tiempo, el dispositivo puede quemarse.

Es interesante tener en cuenta que un efecto permanente puede ser acumulativo o SEE, y un SEE puede ser transitorio o permanente. Vemos algunos ejemplos: un SET es un SEE transitorio; un SEU es un SEE permanente; el aumento que se produce en la corriente de oscuridad de un fotodiodo es un efecto de DD permanente acumulativo, y la señal que se genera instantáneamente en un fotodiodo por la acción de la ionización lo consideramos un efecto de ionización transitorio.

Se ha comentado que los efectos o daños permanentes pueden llegar a recuperarse pasado un tiempo. Se va a explicar el significado de esto, pues tiene implicaciones importantes de cara al comportamiento de los dispositivos en espacio. La recuperación es muy diferente si se trata de un efecto acumulativo o de un SEE. Pero en general pueden ser de dos tipos, recuperación natural (sucede de forma automática sin intervención externa) y recuperación inducida. Vemos un par de ejemplos ilustrativos de la recuperación de SEE:

- En el caso de un SEU, en el que la posición de una memoria cambie un '1' por un '0', la recuperación puede venir de que exista una redundancia y ese dato esté almacenado por triplicado. Cada cierto tiempo se verifica si los tres datos redundados son iguales, y en el caso de que uno de ellos sea diferente, se procede a restituirlo.
- Los *latchup* producen un cortocircuito que puede quemar el dispositivo, pero si se apaga antes de que esto suceda, al volver a encenderlo funciona normalmente. Para evitar que se queme, se implementan circuitos de protección que ante un pico de corriente desconectan la alimentación.

En el caso de los efectos acumulativos la recuperación se produce por un proceso de relajación térmica denominado *annealing* o **recuperación natural térmica**. Existen varios mecanismos que explican el *annealing*. En los efectos de ionización la recuperación se produce si el par e-h se recombina. En este proceso de recombinación

influye la movilidad de los portadores que depende de la temperatura. En el caso de los DD el *annealing* se produce cuando el defecto de red es reabsorbido. Los defectos atómicos en la red también poseen una cierta movilidad, un átomo desplazado de su posición original, que crea una vacante, puede volver, repentinamente al lugar que ocupaba. La temperatura aumenta la movilidad de estos átomos favoreciendo el proceso de *annealing*. No solo la temperatura induce el *annealing* (recocido en castellano), la inyección de una corriente también favorece esta recuperación. Y no solo es por el hecho de que el paso de una corriente calienta el material, sino porque los electrones interaccionan con los átomos de la red y ayudan a la “absorción” de algunos tipos de defectos. No todos los tipos de dispositivos y tecnologías se recuperan de los daños permanentes, y los que lo hacen pueden hacerlo a diferentes ritmos.

El *annealing* es un efecto que compite contra la degradación. Este provoca que el ritmo de degradación no dependa solo de la cantidad total de energía absorbida. Por este motivo se pueden encontrar dispositivos que aparentemente se degradan mucho cuando se ensayan en Tierra a ritmos altos de irradiación (al *annealing* no le da tiempo a actuar), y se degradan menos en órbita donde la acumulación de radiación es lenta, y el *annealing* va recuperando progresivamente a la par que se producen los daños.

El *annealing*, por tanto, ayuda a ralentizar la degradación acumulada por un dispositivo. No suele ser fácil de evaluar y modelizar, e introduce incertidumbres en el análisis de fiabilidad de los componentes, y en el cálculo del tiempo de vida útil.

Existe otro fenómeno cuyo efecto es el contrario al de *annealing*, y que se manifiesta acelerando el daño que se genera cuando se irradia a ritmos muy bajos, como sucede en espacio. Es conocido como **ELDRS** (*Enhanced Low Dose-Rate Sensitivity*). Se produce en los procesos ionizantes que afectan a dispositivos electrónicos de tecnología bipolar y el mecanismo por el que se produce no es todavía completamente conocido. En la práctica la degradación observada en órbita es mucho más rápida que la observada en laboratorio.

### 1.3 Magnitudes y unidades de medida de radiación

Cuando la radiación es corpuscular, se emplean habitualmente las siguientes unidades para expresar la cantidad de estas partículas que hay en un entorno de radiación:

- **Flujo de partículas ( $\phi$ ):** es el número de partículas que atraviesan la unidad de superficie en un segundo. Se utilizan las siguientes unidades:

$$\underbrace{\frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \equiv \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}}_{\text{Sistema Internacional}} \equiv \underbrace{\begin{cases} \frac{e^-}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} & \rightarrow \text{En el caso de } e^- \\ \frac{p^+}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \equiv \underbrace{\text{pfu}}_{\text{Proton flux unit}} & \rightarrow \text{En el caso de } p^+ \end{cases}}_{\text{Otros acuerdos}} \quad 1-1$$

- **Fluencia de partículas ( $\Phi$ ):** es el número total de partículas que ha atravesado la unidad de superficie. Al igual que en el caso del flujo se puede expresar indicando la partícula a la que se quiere hacer referencia:

$$\underbrace{\frac{1}{\text{cm}^2} \equiv \text{cm}^{-2}}_{\text{Sistema Internacional}} \equiv \underbrace{\begin{cases} \frac{e^-}{\text{cm}^2} & \rightarrow \text{En el caso de } e^- \\ \frac{p^+}{\text{cm}^2} \equiv \underbrace{\text{pfu}}_{\text{Proton fluence unit}} & \rightarrow \text{En el caso de } p^+ \end{cases}}_{\text{Otros acuerdos}} \quad 1-2$$

A lo largo de este trabajo de tesis se empleará de forma general el SI, pero las gráficas y datos mostrados de la literatura son expresados en las unidades originales en las que fueron publicados.

De forma general, la fluencia y flujo se relacionan mediante la siguiente integral temporal:

$$\Phi = \int_{t_i}^{t_f} \phi(t) dt \quad 1-3$$

en donde  $t_i$  es el instante inicial y  $t_f$  el instante final.

En el caso particular de que el flujo sea constante en el tiempo:

$$\Phi = \phi \cdot \Delta t \quad 1-4$$

en donde  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido.

Ambas magnitudes pueden expresarse como una magnitud integral o diferencial en relación a la energía de las partículas:

- Fluencia o flujo **integral** se refiere al número de partículas de energía superior o igual a una dada.



- Fluencia o flujo **diferencial** se refiere al número de partículas de energías comprendidas en un intervalo de energía.

Como se ha mencionado, los efectos de la radiación se producen por la energía que absorbe el material irradiado. Por lo tanto la cantidad de partículas que atraviesan el material no es directamente proporcional al efecto o daño producido. Por esta razón, es más conveniente el uso de unidades dosimétricas que expresan la energía absorbida.

En los efectos de ionización se habla de dosis de ionización o dosis total de ionización (**TID** – *Total Ionizing Dose*). El TID se expresa en el SI en J/kg, pero son más comunes el **rad** (rad) y el **Gray** (Gy) donde la correspondencia entre ellas es:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg} \quad 1-5$$

La misma fluencia de un determinado tipo de partículas no deposita la misma cantidad de energía en todos los materiales. Es por lo tanto necesario indicar el material que ha sido expuesto a la radiación. Para indicar el material se suele poner entre paréntesis de la siguiente forma: 1 rad(Si). Lo cual está indicando que la dosis ha sido de 1 rad sobre silicio. Si se hubiera aplicado la misma fluencia de partículas sobre otro material, la dosis hubiera sido diferente. En el contexto de los efectos en dispositivos electrónicos se suele hablar de dosis en silicio, así que si no se especifica lo contrario, esto es lo que se sobreentiende. Aunque expresarlo en Arseniuro de Galio (GaAs) es también común en los sistemas que integran dispositivos optoelectrónicos.

Otra magnitud que se usa de forma habitual es el “ritmo de ionización” (*Dose Rate*), que expresa la cantidad de rad acumulados por segundo (rad/s) y nos indica si la energía se está absorbiendo rápidamente o de forma pausada. En la práctica tiene gran importancia cuando estamos ante dispositivos sensibles a ELDRS, o a efectos de recuperación natural (*annealing*).

En el caso de los DD suele emplearse una unidad similar al TID, la “Dosis Total de no-ionización” (**TNID** – *Total Non-Ionizing Dose*) o también llamada por algunos autores Dosis de Daños por Desplazamiento (**DDD** – *Displacement Damage Dose*). El DDD se define como la energía absorbida, en la unidad de masa, por interacciones con los átomos de la red cristalina. Se usan unidades de MeV/g o keV/g y su relación con el sistema internacional es:

$$1 \text{ (MeV/g)} = 1,602177 \cdot 10^{-10} \text{ (J/kg)} \quad 1-6$$

En este contexto, si no se indica lo contrario, se vuelve a suponer que está referido a silicio, pero especialmente con los DD, que afectan a dispositivos optoelectrónicos (y por ello a otros semiconductores), es habitual expresarlo en MeV/g(GaAs), MeV/g(AlGaAs) o MeV/g(SiC) dependiendo del material del dispositivo que se esté manejando.

Es también habitual expresar el daño usando lo que se conoce como fluencia equivalente ( $\Phi_{eq.}$ ) que será definido después de explicar otros conceptos como son el LET y el NIEL.

Hasta aquí, se ha explicado que existen dos tipos de magnitudes que describen el entorno de radiación, las que indican la energía absorbida por un material (dosis) y las que indican el número de partículas que atraviesan dicho material (fluencia), ahora se explicará como pasar de unas a otras a través del concepto de LET y de NIEL.

En el caso de la ionización, se define una magnitud denominada LET (*Linear Energy Transfer*) que aunque tiene varios matices y diversos convenios se puede decir que es la energía absorbida por un material por unidad de longitud cuando una partícula lo atraviesa, y viene expresada en MeV/cm [Icru16].

$$\text{LET}(\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-1}) = \frac{dE}{dx} \quad 1-7$$

Integrando el LET respecto de la distancia recorrida por la partícula se obtiene la energía total que ha depositado dicha partícula en su recorrido. Esta definición no distingue, a priori, entre si la energía cedida es por ionización o por “no-ionización”. En el caso de partículas con carga, que es cuando se aplica este concepto, la contribución de ionización es dominante y el resto (DD) se considera despreciable.

Si multiplicamos la energía cedida por una partícula por el número total de partículas incidentes en el área de nuestro material ( $A$ ), y dividimos por la masa ( $m$ ), se obtiene el TID en MeV/g:

$$\text{TID}(\text{MeV/g}) = \frac{\Phi(\text{cm}^{-2}) \cdot A(\text{cm}^2)}{m(g)} \int \text{LET}(\text{MeVcm}^{-1}) dx \quad 1-8$$

Sustituyendo la masa por el volumen y densidad del medio ( $\rho$ ), e introduciendo la densidad en la integral, se obtiene:

$$\text{TID}(\text{rad}) = 1,602177 \cdot 10^{-8} \left( \text{rad}/\text{MeV/g} \right) \frac{\Phi(\text{cm}^{-2})}{w(\text{cm})} \int_0^d \frac{\text{LET}(\text{MeVcm}^{-1})}{\rho(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})} dx \quad 1-9$$

Donde  $1,6 \cdot 10^{-8}$  es una constante que viene de la relación entre eV y J para expresar el TID en rad,  $w$  es el espesor de material irradiado, y  $d$  la distancia total recorrida por la partícula dentro del material.

Actualmente el LET suele expresarse normalizado con la densidad, por lo que la expresión anterior es directamente:

$$\text{TID}(\text{rad}) = 1,602177 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{w} \int_0^d \text{LET}(\text{MeVcm}^2/\text{g}) dx \quad 1-10$$

En el caso de una lámina delgada, que supone una buena aproximación en la mayoría de los dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, el TID se puede aproximar a:

$$\text{TID}(\text{rad}) = 1,602177 \cdot 10^{-8} \text{LET}(\text{MeVcm}^2/\text{g}) \cdot \Phi(\text{cm}^{-2}) \quad 1-11$$

La dependencia del LET con la profundidad de penetración se muestra en la Fig. 1-12 para algunas partículas. El caso de los protones es conocido como función de Bragg, y es clave en el uso de las radiaciones ionizantes en terapias médicas, pues permite irradiar partes internas del cuerpo sin afectar a

los tejidos externos. Sin embargo, esta característica provoca que el uso de apantallamientos protectores en vehículos espaciales pueda llegar a ser contraproducente en algunos casos concretos, o poco efectivo en otros. La función de Bragg es una

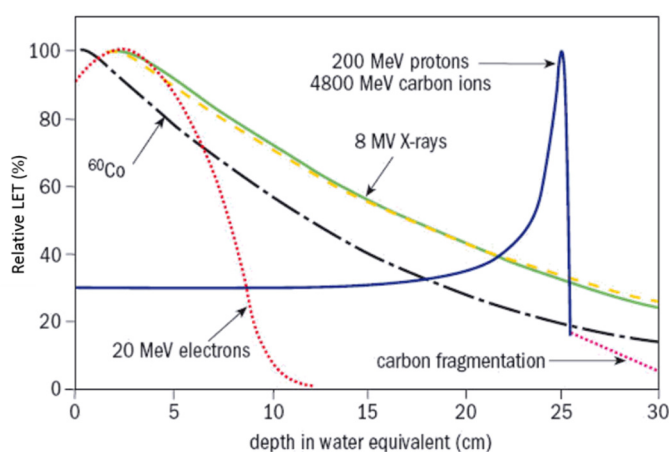


Fig. 1-12. LET vs. profundidad de penetración

consecuencia directa de la dependencia del LET (y del NIEL como se verá más adelante) con la energía de la partícula. El LET aumenta al disminuir la energía (Fig. 1-13, Fig. 1-14, Fig. 1-15 y Fig. 1-16). La partícula a medida que va atravesado el material se frena y pierde energía al interaccionar con el material, la pérdida de energía aumenta el valor del LET, por lo tanto a mayor profundidad mayor LET. Al final del recorrido, cuando la partícula se frena totalmente, el LET es máximo. Esto significa que la partícula cede más energía al final de su recorrido, y por ello provoca más daño en las zonas profundas del material que en las externas.

La ecuación 1-11 era suponiendo una flujo de partículas monoenergético. En el caso general, el TID se calcula mediante una integral:

$$\text{TID(rad)} = 1,602177 \cdot 10^{-8} \int_0^{\infty} \text{LET}(E) \cdot \underbrace{\frac{d\Phi(E)}{dE}}_{\substack{\text{Fluencia} \\ \text{diferencial}}} \cdot dE \quad 1-12$$

Para calcular el TNID se utiliza una formulación similar, pero usando el NIEL (*Non Ionizing Energy Loss*) en vez del LET. El NIEL se puede entender como la energía absorbida en procesos “no ionizantes” por unidad de distancia penetrada, es decir, un concepto similar el LET pero referido solo a pérdida de energía por desplazamiento atómico. Por lo cual, en el supuesto de una lámina delgada se llega a una expresión, que es similar a la 1-11 del TID con el LET, pero con el NIEL:

$$\text{TNID(MeV/g)} = \text{NIEL (MeVcm}^2/\text{g)} \cdot \Phi(\text{cm}^{-2}) \quad 1-13$$

Al igual que se veía en el caso del LET de los  $p^+$ , el NIEL también aumenta su valor al disminuir la energía. La Fig. 1-13 y la Fig. 1-14 muestran el NIEL en función de la energía en silicio y en GaAs respectivamente.

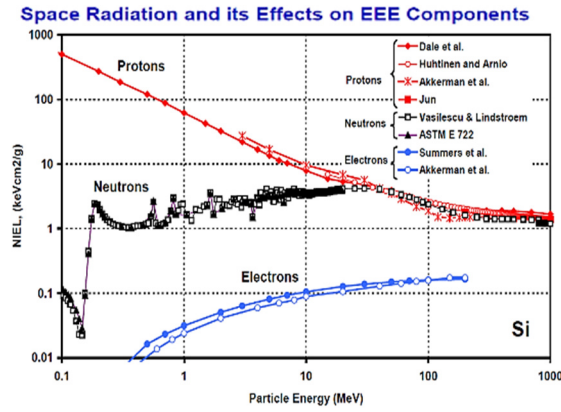


Fig. 1-13. NIEL vs. energía de diferentes partículas en silicio [Poi09]

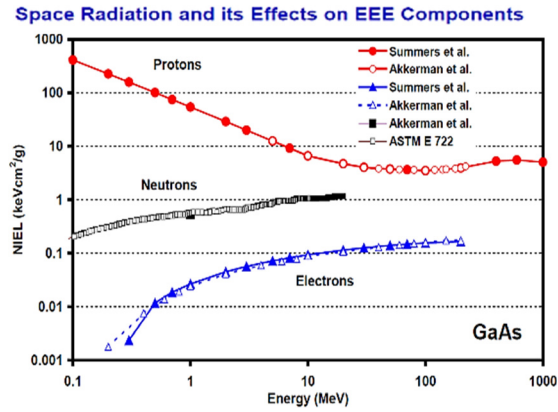


Fig. 1-14. NIEL vs. energía de las partículas en GaAs [Poi09]

Por lo tanto, el NIEL en función de la profundidad de penetración, presenta un comportamiento parecido al del LET y la función de Bragg. Se había comentado que las dosis de desplazamiento son generalmente despreciables frente a las de ionización. En la Fig. 1-15 se muestran tanto el LET como el NIEL de protones en silicio, se observa como hay tres órdenes de magnitud de diferencia entre las dos. La diferencia entre el LET y el NIEL en GaAs es algo menor, incluso se hacen del mismo orden a energías bajas (Fig. 1-16).

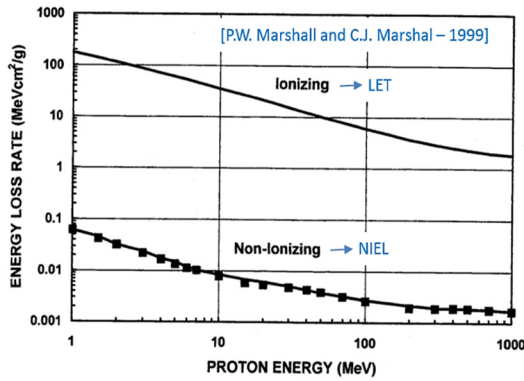


Fig. 1-15. Comparativa del NIEL y del LET de protones en silicio [Mar99]

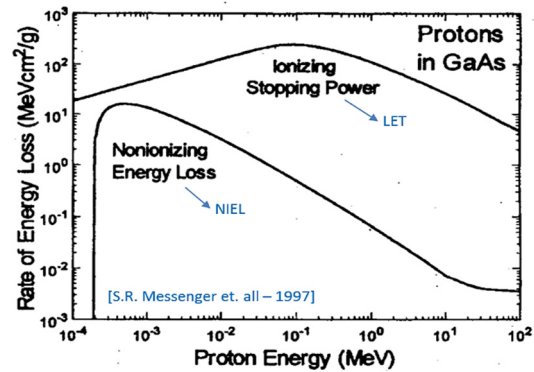


Fig. 1-16. Comparativa del NIEL y del LET de protones en GaAs [Mes97]

De nuevo, en el caso general de una fluencia espectral  $\Phi(E)$ , el TNID se calcula por medio de la siguiente integral:

$$\text{TNID} = \int_0^{\infty} \text{NIEL}(E) \cdot \underbrace{\frac{d\Phi(E)}{dE}}_{\text{Fluencia diferencial}} \cdot dE \quad 1-14$$

Conviene indicar que algunos autores, en especial en el ámbito de la física de partículas, utilizan una magnitud denominada “sección eficaz de los daños por desplazamiento” ( $D$ ) para calcular el TNID en lugar del NIEL:

$$\text{TNID}(\text{MeV/g}) = 10^{-27} \left( \text{cm}^2/\text{mb} \right) \cdot \frac{N_A}{A} D(\text{MeV} \cdot \text{mb}) \cdot \Phi(\text{cm}^{-2}) \quad 1-15$$

en donde:

- [mb] es una unidad de superficie llamada “barn” que es aproximadamente igual a la sección transversal del átomo de uranio ( $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).
- $N_A$  es el número de Avogadro ( $6,022 \cdot 10^{23}$ )
- $A$  es la masa atómica de los átomos del material irradiado.

En algunas ocasiones se encuentran autores que denominan NIEL a la  $D$  y lo expresan en  $\text{MeV} \cdot \text{mb}$ . La relación de transformación entre NIEL y  $D$  depende del material irradiado y de su número atómico. En el caso de silicio esta relación es:

$$100 (\text{MeV} \cdot \text{mb}) = 2,144 \cdot 10^{-3} (\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}) \quad 1-16$$

Con anterioridad en este capítulo se ha indicado que en ocasiones se expresa el TNID en una magnitud denominada **fluencia equivalente** ( $\Phi_{\text{eq}}$ ). Ahora se verá que significa este concepto.

La fluencia equivalente se expresa referida a un tipo de partícula o a una energía diferente a la radiación que ha producido un determinado daño. Esta fluencia equivalente es la fluencia de ese otro tipo de partículas que hubiera sido necesaria para producir el mismo daño.

Esto viene de que un TNID concreto, producido por una distribución espectral de fluencia  $d\Phi(E)/dE$ , también puede producirse con la fluencia mono-energética de un tipo concreto de partículas, por ejemplo  $p^+$  de 10 MeV:

$$\text{TNID} = \int_0^\infty \text{NIEL}(E) \cdot \frac{d\Phi(E)}{dE} \cdot dE = \text{NIEL}_{p^+(10\text{MeV})} \Phi_{eq.p^+(10\text{MeV})} \quad 1-17$$

Es común el uso de equivalentes de  $p^+$  de 10 MeV ( $\Phi_{eq.p^+(10\text{MeV})}$ ) y de neutrones de 1 MeV ( $\Phi_{eq.N(1\text{MeV})}$ ).

De esta forma, cualquier entorno de radiación puede aproximarse a una fluencia de partículas de una determinada energía que produzca el mismo TNID, sin más que conocer el NIEL del tipo de partícula y energía en el que se quiera expresar:

$$\Phi_{eq.A} = \frac{1}{NIEL_A} \cdot TNID \quad 1-18$$

Para cambiar entre equivalentes de unas partículas a otras, o de unas energías a otras, solo se necesita conocer la relación entre los NIEL de ambas partículas:

$$\Phi_{eq.A} = \frac{NIEL_B}{NIEL_A} \cdot \Phi_{eq.B} \quad 1-19$$

Este desarrollo está basado en la cuantificación de la energía absorbida por el material, y se ha dejado entrever que esta energía es proporcional al daño. Se está suponiendo que una cantidad de energía absorbida siempre produce el mismo daño o efecto. Esto es realmente así en el caso de la ionización, en donde 1 krad siempre produce el mismo efecto independientemente si ha sido producido por protones, electrones, neutrones o cualquier otra radiación de cualquier energía. El número de pares e-h generados por la energía absorbida de ionización (el daño microscópico que se acumula), que se obtiene de dividir la energía de ionización absorbida por la energía necesaria para generar el par e-h (que en el caso del Si es 3.6 eV y en el del SiO<sub>2</sub> es 18 eV), es directamente proporcional al daño o efecto macroscópico observable. Además, hasta la fecha, no se ha encontrado ninguna excepción a esta regla. Es decir, los daños observables son proporcionales al LET.

Sin embargo, en los DD, esta relación directa entre el NIEL y los daños, llamada hipótesis de escalado del NIEL (*NIEL scaling hypothesis*), que ha sido ampliamente usada, no funciona para todos los casos de forma general. Aunque se sigue usando y se considera una buena primera aproximación, se han encontrado algunas excepciones. La implicación práctica de esto es que no es extrapolable la medida del daño realizada con un tipo de partícula o energía, al daño que producirían otras partículas. Aun así, es común aplicar la hipótesis de escalado del NIEL, pues funciona razonablemente bien en la mayoría de los casos. La explicación de esto es que a diferencia de la ionización, los DD generan diferentes tipos de defectos microscópicos con energías de activación distintas y una probabilidad de que sucedan diferente que depende del tipo de partícula y de su energía. Por lo tanto, la misma cantidad de energía absorbida en forma de daños por

desplazamiento puede provocar distintos tipos de daños microscópicos, y esto se traduce en que el daño macroscópico observable en las características del dispositivo no sea siempre el mismo. Por eso hay excepciones a la hipótesis de escalado del NIEL.

#### 1.4 Desarrollos espaciales y la madurez tecnológica – TRL

La NASA estableció una métrica para determinar el *nivel de madurez tecnológica* de una tecnología o instrumento. Se la conoce como escala del TRL (*Technology Readiness Level*). Esta métrica establece 9 niveles que van desde la concepción de la idea (TRL 1) hasta el uso de dicha tecnología o instrumento, tras un proceso de calificación espacial, en una misión real en la que se obtengan resultados satisfactorios (TRL 9).

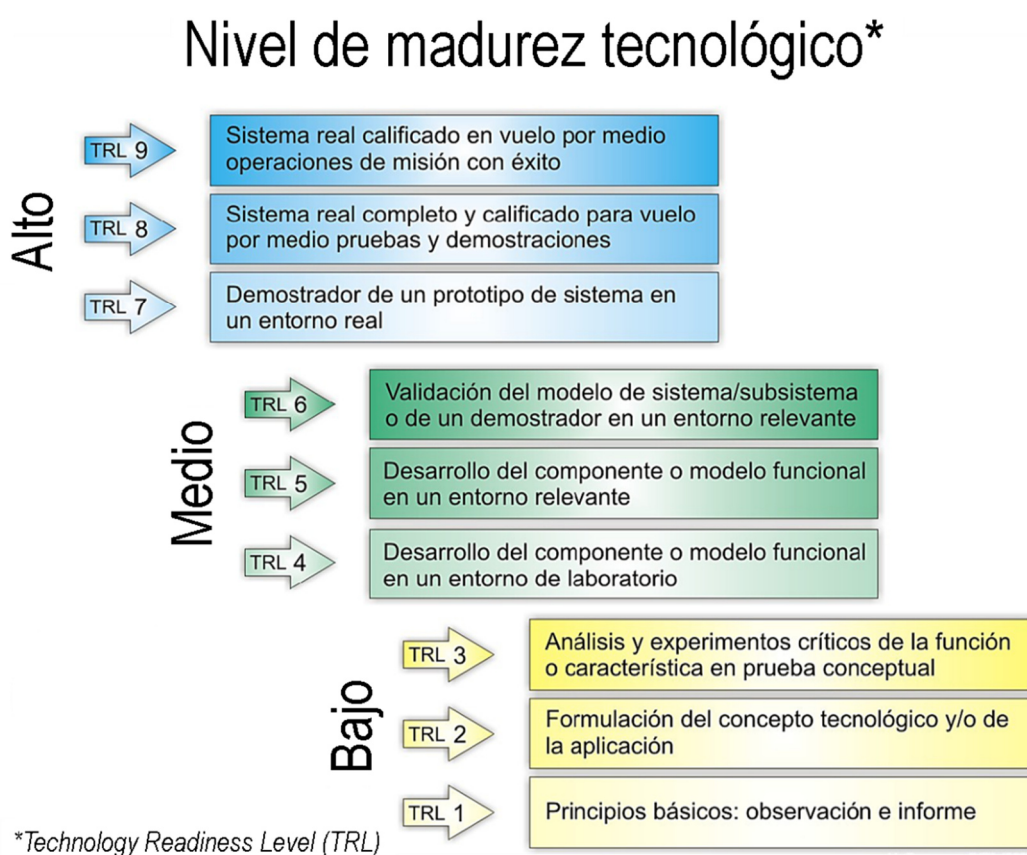


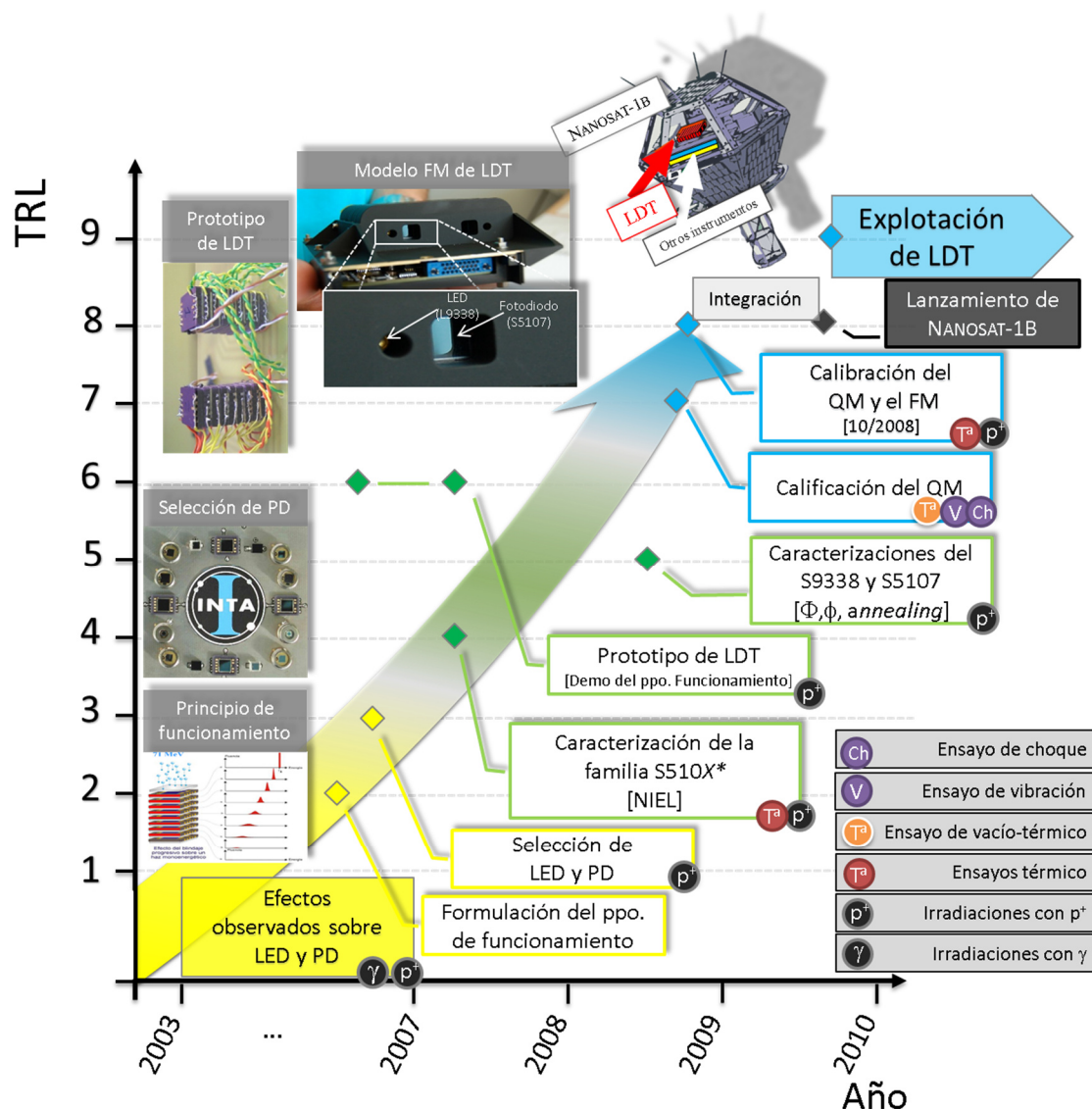
Fig. 1-17. Nivel de madurez tecnológica (*Technology Readiness Level* – TRL)

Al aumentar el nivel de madurez tecnológica se está disminuyendo el riesgo de fallo de esta tecnología al usarla en el espacio. Por lo tanto un instrumento con un TRL 7 o TRL 8 es más fiable que a uno que solo haya alcanzado un TRL 5.

A lo largo de este trabajo de tesis se verá cómo LDT va subiendo su nivel de madurez tecnológica desde el TRL 1, en la explicación de los conceptos básicos de funcionamiento, hasta el TRL 9 en la operación a bordo de NANOSAT-1B (NANOSAT).



En la Fig. 1-18 se muestra un gráfico en el que se indican los principales hitos del desarrollo de LDT y el TRL alcanzado. Se presentan también algunas fotografías de los diferentes momentos del desarrollo. Durante la tesis se irá hablando de todos ellos a excepción del proceso de calificación espacial, que por tratarse de la calificación para una órbita LEO los procedimientos son estándar y no fue necesario realizar ninguna innovación reseñable. El proceso de calificación se realizó íntegramente en las instalaciones del INTA, en donde se pueden encontrar cámaras térmicas, de vacío, plataformas de vibración y choque para la ejecución de la calificación ambiental del instrumento y del satélite.



\* Los fotodiodos de la familia del S510X y que fueron caracterizados son el S5107, el S5106 y el S7510.

Fig. 1-18. Nivel de madurez tecnológica (*Technology Readiness Level* – TRL)

## **2 LDT: un monitor de radiación**

*Este capítulo presenta el principio de funcionamiento de LDT. También se describen las irradiaciones de un prototipo del instrumento fabricado para verificar este principio de funcionamiento. Posteriormente, se abordan los ensayos que se realizaron para la identificación de posibles problemas en la calibración y establecer pautas para su ejecución.*

## 2.1 Principio de funcionamiento

En LDT se aprovechan los efectos macroscópicos ([Mol99], [Mol02], [Joh00] y [Joh01]) observables que provoca la radiación sobre dos tipos de dispositivos, un LED y un fotodiodo, para medir la radiación del entorno. Se aprovechan tanto los efectos provocados por los DD, como por la ionización. A estos dispositivos se les añaden unas estructuras que actúan como escudo de radiación para modular el efecto que esta genera.

En esta sección se van a describir cuáles son estos efectos medibles, cómo afectan los escudos de radiación y cómo aprovecharlo para medir la radiación del entorno.

### 2.1.1 Efectos observables – Factor de daño y sensibilidad a la ionización

Como hemos visto al principio de la tesis los efectos pueden ser permanentes o transitorios. En LDT se aprovechan ambos tipos, y esto proporciona una buena herramienta de auto-comparación y verificación del funcionamiento. Pero no es la única herramienta que se tiene para verificar si el instrumento está midiendo correctamente. Al haber introducido dos dispositivos diferentes (el LED y el fotodiodo) también se podrá realizar comparaciones entre ellos. Monitores de radiación existen de muchas clases [Rav06], LDT está basado en dispositivos electrónicos de estado sólido, que son los más recomendables y sencillos de usar en aplicaciones espaciales. Además, los efectos permanentes que se usan se acumulan de forma indefinida incluso con el dispositivo apagado, lo que permitirá gran sencillez de operación y un bajo consumo de recursos.

Los **efectos permanentes son efectos de DD** que afectan tanto a los fotodiodos como a los LED. Estos DD provocan unos efectos macroscópicos que se pueden medir y que por la hipótesis de escalado del NIEL son proporcionales a la TNID (*scaling NIEL hypothesis* [Huh93, Sum93, Vas96]). Estos efectos se pueden calibrar para obtener una relación entre el efecto macroscópico medible y la fluencia de protones, o la TNID, acumulada.

En el caso del **fotodiodo**, el **efecto medible es el aumento de la corriente de oscuridad** [Wic82], con toda la problemática que esto conlleva, en especial relacionado con el *annealing* [Mon14], y que en este trabajo ha sido solucionada. Este aumento es proporcional a los DD y por la hipótesis de escalado del NIEL es también proporcional a la TNID y a la fluencia de protones incidentes.

Por lo tanto, partiendo de un estado inicial de corriente de oscuridad  $I_{osc}^i$ , suponiendo un haz mono-energético de energía  $E_i$  y una fluencia total de protones incidentes de dicha energía  $\Phi_{E_i}$ , la corriente de oscuridad final viene dada por:

$$I_{osc}^f = K_{osc}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} + I_{osc}^i \quad 2-1$$

Y el aumento de la corriente de oscuridad es:

$$\Delta I_{osc} = K_{osc}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} \quad 2-2$$

En esta expresión,  $K_{osc}^{E_i}$  es el denominado **factor de daño** (*Damage Factor* – [Lar68], [Mes92], [Mol99], [Seg09] o [Cla02]) de la corriente de oscuridad y se expresa en  $A \cdot cm^2$ . El factor de daño se define como la variación que sufre una magnitud por la unidad de fluencia y depende de varios factores: la tecnología del sensor, el tipo de partículas incidentes, su energía y del efecto macroscópico que se esté midiendo, en este caso es la corriente de oscuridad ([Sro00] y [Sro03]).

En el caso del **LED**, el **efecto medible es el decaimiento de la potencia de luz emitida** por el LED que se produce al aumentar los DD o la TNID, que por la hipótesis de escalado del NIEL se consideran proporcionales. Esta degradación de la potencia emitida por el LED se mide a través de la fotocorriente generada en el fotodiodo. La corriente del fotodiodo tiene ahora dos componentes: la de la corriente de oscuridad y la de la fotocorriente. La fotocorriente, en primera aproximación, es inversamente proporcional a la fluencia:

$$I_{LED}^f = \underbrace{K_{osc}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} + I_{osc}^i}_{I_{osc}^f} + K_{LED}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} + I_{LED}^i \quad 2-3$$

en donde  $K_{LED}^{E_i} < 0$  es el factor de daño de la potencia óptica del LED y viene expresado en  $A \cdot cm^2$ ,  $I_{LED}^i$  es la fotocorriente inicial generada en el fotodiodo por la acción de iluminación del LED. La corriente de oscuridad de un fotodiodo es generalmente muy pequeña y si el fotodiodo se ilumina con suficiente luz, es despreciable frente a la fotocorriente ( $I_{osc}^f \ll I_{LED}^i$ ), y como se verá en capítulos posteriores el factor de daño de la corriente de oscuridad es también mucho menor que el del LED ( $k_{osc}^{E_i} \ll k_{LED}^{E_i}$ ) por lo que la expresión 2-3 se puede escribir así:

$$\Delta I_{LED}^f = K_{LED}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} \quad 2-4$$

Los **efectos transitorios** son **efectos de ionización** que generan una corriente proporcional al ritmo de ionización. Cada protón que atraviesa el área activa del fotodiodo produce un SET, es decir, una pequeña generación de carga que se puede medir. Pero no se contabilizan los protones identificando los SET uno a uno, se monitoriza el nivel de corriente media que genera el fotodiodo. Este nivel de corriente media aumenta proporcionalmente al número de partículas por segundo que lo atraviesan:

$$\Delta I_{Ion} = K_{Ion}^{E_i} \cdot \Phi_{E_i} \quad 2-5$$

en donde  $K_{Ion}^{E_i}$  es la sensibilidad del fotodiodo al flujo de protones y se expresa en  $A/cm^2s^{-1}$ , y  $\Phi_{E_i}$  es el flujo de protones incidentes expresado en  $cm^{-2}s^{-1}$ .

A lo largo de este capítulo no se va a distinguir de que efecto o dispositivo se está hablando, pues todos los razonamientos son válidos para los tres casos, por este motivo se va a prescindir de los subíndices “Osc”, “LED” y “Ion”, aunque por simplificar la escritura y ayudar a la comprensión de los conceptos en algunos casos se particularizará en el texto refiriéndose a la corriente de oscuridad.

$$\left. \begin{matrix} K_{osc}^{E_i} \\ K_{LED}^{E_i} \\ K_{Ion}^{E_i} \end{matrix} \right\} \rightarrow K_{E_i} \quad \left. \begin{matrix} \Delta I_{Osc} \\ \Delta I_{LED} \\ \Delta I_{Ion} \end{matrix} \right\} \rightarrow \Delta I \quad 2-6$$

### 2.1.2 Efecto de los apantallamientos

Se estudiará el efecto que produce sobre las señales medidas en LDT el incluir un blindaje, o apantallamiento, al dispositivo detector de radiación, ya sea al LED o al fotodiodo.

Un sensor sin apantallar, idealmente, es sensible a todos los protones incidentes. Un sensor apantallado por una capa de aluminio de varios milímetros solo será sensible a los protones que tengan suficiente energía para atravesar el blindaje y llegar hasta la zona activa de ese sensor. A la energía mínima necesaria para producir un efecto medible en el sensor la llamaremos **energía umbral**. Al conjunto formado por un **sensor** con un **apantallamiento** (o escudo de radiación) se le llamará **canal**, así canales diferentes tendrán blindajes diferentes. Se identificarán los apantallamientos por los mm de aluminio

de su espesor, y se considerará que un sensor sin apantallar es un caso particular en el que el apantallamiento es nulo.

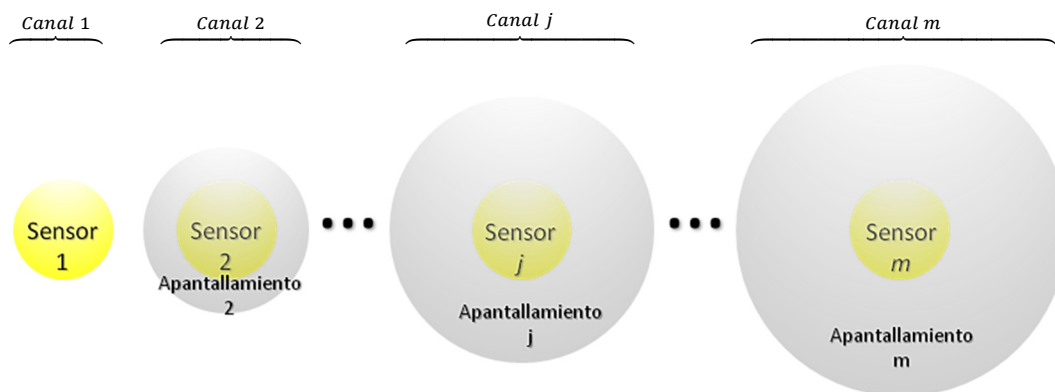


Fig. 2-1. Representación de  $m$  canales.

Las Dos Torres (LDT) es un monitor de protones multicanal formado por ocho canales diferentemente apantallados. Este apantallamiento, distinto para cada canal, hace que cada uno de estos sea solo sensible a protones de energía superior a un cierto umbral dependiente de dicho blindaje o escudo.

Bajo ciertas aproximaciones, usando la respuesta del primer canal (que no tiene escudo de radiación), se podría calcular cual es la cantidad de protones que han incidido sobre el sensor. Con la respuesta de un canal apantallado, se podría obtener la cantidad de protones que tienen energía superior a su energía umbral. Comparando ambos, se podría inferir la cantidad de protones que han llegado por debajo de esa energía umbral y cuantos por encima. Combinando las señales de varios canales, se podría llegar a calcular cuántos protones se han recibido en cada una de las bandas energéticas marcadas por las energías umbrales de los apantallamientos correspondientes a cada canal.

Los sensores se apilan formando una torre. Cada sensor está colocado en un piso de la torre, la estructura de la torre y el resto de sensores que están delante y detrás forman parte del apantallamiento del sensor. Todos los sensores de la torre están orientados en la misma dirección y sentido, el sentido hacia el que están orientados lo denominaremos parte frontal de la torre. Los pisos se enumeran desde la parte frontal hacia la trasera (Fig. 2-2).

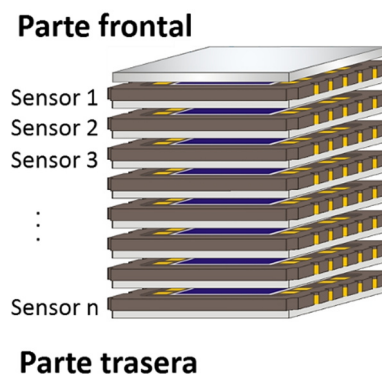


Fig. 2-2. Sensores apilados

Los protones que inciden desde la parte frontal de la torre necesitan mayor energía para llegar al último piso que para alcanzar el primero. En la Fig. 2-3 se representa este efecto: se ve como los protones de energía baja (~10MeV) solo alcanzan el primer piso y como los protones de ~80 MeV llegan hasta el último. En la figura se han marcado en rojo los pisos que se están viendo afectados por los protones incidentes.

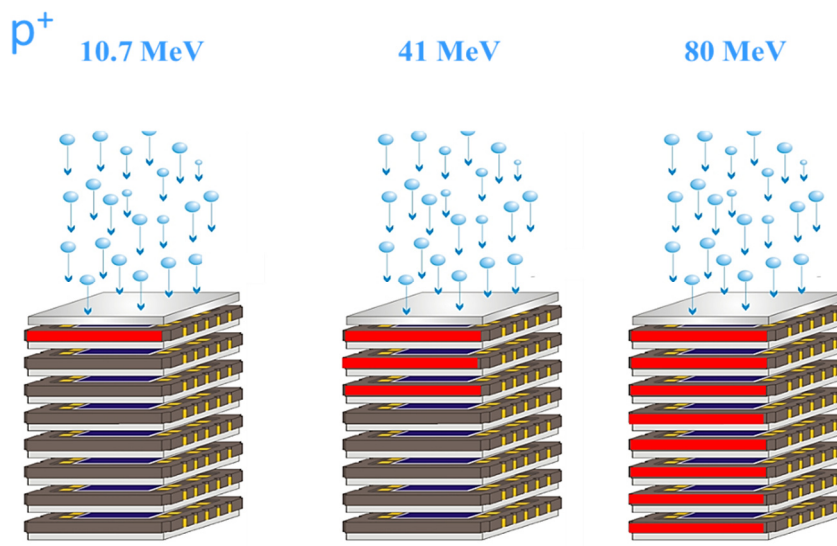


Fig. 2-3. Energía necesaria de los protones incidentes para alcanzar el primer piso, el tercero y el último. Los pisos marcados en rojo son aquellos a los que llegan protones.

Se debe tener en cuenta que los protones se frenan de piso a piso, es decir, pierden energía. Esto provoca que el efecto de un protón no sea el mismo en cada piso que atraviesa. Cada protón produce un efecto diferente dependiendo de la energía que tiene al atravesar el piso. Esta dependencia viene dada por su NIEL, es decir, cuanto mayor es la energía del protón, menor es el efecto producido. En la Fig. 2-4 se muestra un esquema de una torre similar a la que se ha desarrollado en LDT (8 elementos de fotodiodos S5106 usando 0,5 mm de aluminio de apantallamiento extra entre fotodiodo y fotodiodo) bajo la irradiación de un

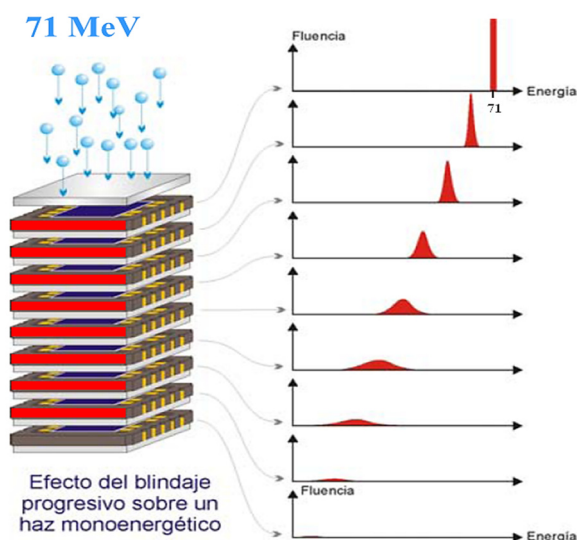


Fig. 2-4. Efecto del blindaje sobre el espectro energético de partículas incidentes con energía suficiente para alcanzar el penúltimo piso.

haz mono-energético de 71 MeV y como la energía va disminuyendo hasta frenarse del todo en el penúltimo. Se aprecia otro efecto, el espectro se ensancha, esto tendrá importantes implicaciones prácticas en las irradiaciones y en la definición de la energía umbral.

Para iniciar la descripción detallada del principio de funcionamiento se fija un tipo de sensor: fotodiodo PIN de Si; y se elige un efecto a la fluencia de protones: el aumento de la corriente de oscuridad. Nos referiremos a este caso concreto, aunque no se debe olvidar que este desarrollo es válido para cualquier otro efecto o dispositivo.

Los siguientes apartados tienen como objetivo explicar, paso a paso, los detalles y conceptos que ayudan a entender el funcionamiento de LDT. Nos apoyaremos en 5 casos:

1. Análisis de los efectos sobre un sensor sin apantallar bajo dos supuestos diferentes: espectro mono-energético y espectro multi-energético.
2. Análisis de un sensor apantallado homogéneamente.
3. Análisis de un sensor con apantallamientos diferentes.
4. Análisis de un apilamiento de sensores formando una torre.

### 2.1.2.1 Caso I: Análisis de un sensor sin apantallar

#### A. Caso de entorno mono-energético

En un entorno en el que todos los protones que inciden sobre el detector son de la misma energía ( $E$ ), si se conoce el factor de daño del detector ( $K_E$ ), se puede obtener la cantidad exacta de protones incidentes sin más que despejar de la ecuación 2-2:

$$\Phi_E = \frac{\Delta I}{k_E} \quad 2-7$$

Con esta ecuación se puede determinar la fluencia real si se conoce la energía de los protones incidentes y se usa el factor de daño específico de esa energía. También se podría determinar la fluencia equivalente de protones de cualquier otra energía de la que conozcamos su factor de daño usando la ecuación 1-19.

#### B. Entorno multi-energético

Si se parte de un detector sobre el que inciden protones de diferentes energías no es posible obtener la fluencia real sin conocer previamente la distribución espectral. Cada



energía incidente provoca un daño diferente en el detector. En este caso, el aumento de la corriente de oscuridad puede expresarse como una integral:

$$\Delta I = \int_0^{\infty} K(E) \cdot \Phi(E) \cdot dE \quad 2-8$$

Discretizando la expresión anterior se tiene que:

$$\Delta I = \sum_{i=0}^n K_{E_i} \cdot \Phi_{E_i} \quad 2-9$$

Desarrollando el sumatorio:

$$\Delta I = K_{E_1} \cdot \Phi_{E_1} + K_{E_2} \cdot \Phi_{E_2} + K_{E_3} \cdot \Phi_{E_3} + \dots + K_{E_n} \cdot \Phi_{E_n} \quad 2-10$$

Al factor de daño escrito vectorialmente se denominará vector de factores de daño, donde cada elemento es el factor de daño de una energía determinada:

$$K = (K_{E_1}, K_{E_2}, K_{E_3}, \dots, K_{E_n}) \quad 2-11$$

La fluencia se puede también expresar vectorialmente, con lo que la ecuación 2-10 quedaría:

$$\Delta I = (K_{E_1} \quad K_{E_2} \quad K_{E_3} \quad \dots \quad K_{E_n}) \cdot \begin{pmatrix} \Phi_{E_1} \\ \Phi_{E_2} \\ \Phi_{E_3} \\ \vdots \\ \Phi_{E_n} \end{pmatrix} \quad 2-12$$

De la ecuación anterior se conoce el dato experimental del incremento de la corriente de oscuridad ( $\Delta I$ ) y los datos de los diferentes factores de daño ( $K_{E_i}$ ). Como se verá más adelante, éstos últimos se obtienen mediante calibración, y las fluencias de protones para las distintas energías ( $\Phi_{E_i}$ ) son incógnitas.

La ecuación 2-12 tiene infinitas soluciones. Es decir, existen infinitas combinaciones de  $\Phi_{E_i}$  que la satisfacen. Por este motivo, la única estrategia que se puede seguir es la de determinar la fluencia equivalente usando la expresión 2-7 particularizando para una energía concreta, por ejemplo 10 MeV:

$$\Phi_{Eq. 10 MeV} = \frac{\Delta I}{K_{10 MeV}} \quad 2-13$$

Donde  $\Phi_{Eq. 10 MeV}$  es la fluencia equivalente de protones de 10 MeV, y  $k_{10 MeV}$  el factor de daño de 10 MeV.

### 2.1.2.2 Caso II: Análisis de un sensor apantallado homogéneamente

El siguiente paso para entender el comportamiento general de LDT es el estudio del efecto producido sobre un sensor apantallado de forma homogénea, es decir, por un blindaje esférico con el mismo espesor en todas las direcciones del espacio (Fig. 2-5).

El efecto de este blindaje provoca que no lleguen protones de energía inferior a una energía umbral ( $E_u$ ) determinada por el blindaje. Esto se refleja en el vector de daño en que todos los elementos correspondientes a energías inferiores a la energía umbral son nulos:

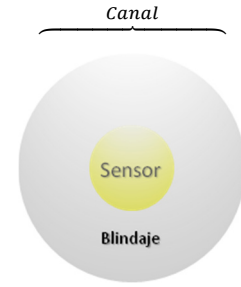


Fig. 2-5. Sensor apantallado con un blindaje homogéneo esférico.

$$K_{E_i} = 0 ; \forall i < u \quad 2-14$$

Donde  $u$  es el índice correspondiente a la energía umbral del canal. Por tanto, la variación de la corriente de oscuridad se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Delta I = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & K_{E_u} & K_{E_{u+1}} & \cdots & K_{E_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Phi_{E_1} \\ \Phi_{E_2} \\ \vdots \\ \Phi_{E_{u-1}} \\ \Phi_{E_u} \\ \Phi_{E_{u+1}} \\ \vdots \\ \Phi_{E_n} \end{pmatrix} \quad 2-15$$

Al igual que antes, hay infinitas soluciones, infinitas combinaciones de fluencias que satisfacen la expresión 2-15, y vuelve a ser útil trabajar con el concepto de fluencia equivalente.

Durante el proceso de calibración pueden obtenerse los factores de daño del sensor apantallado  $(K_{E_u} \ K_{E_{u+1}} \ \cdots \ K_{E_{u+j}} \ \cdots \ K_{E_n})$ , usando cualquiera de ellos en la

ecuación 2-7 se puede obtener el valor de la fluencia equivalente de protones de cualquier energía superior a la energía umbral:

$$\Phi_{Eq. E_{u+j}} = \frac{\Delta I}{K_{E_{u+j}}} \quad 2-16$$

El caso particular de la fluencia equivalente de la energía umbral se va a denominar a partir de aquí *fluencia equivalente umbral* del sensor:

$$\Phi_{Eq. Umbral} = \frac{\Delta I}{K_{E_u}} \quad 2-17$$

### 2.1.2.3 Caso III: Análisis de varios sensores con apantallamientos diferentes

Para continuar se verá ahora el caso de varios sensores con blindajes diferentes.

Supónganse  $m$  canales cada uno con un apantallamiento de diferente espesor, donde el canal 1 se supondrá sin apantallar, el canal 2 con un pequeño apantallamiento algo superior, y así sucesivamente hasta el último canal,  $m$ , el más apantallado de todos. Cada canal  $j$  tendrá asociado una energía umbral  $E_{j_u}$  diferente y mayor cuanto mayor sea el apantallamiento del canal.

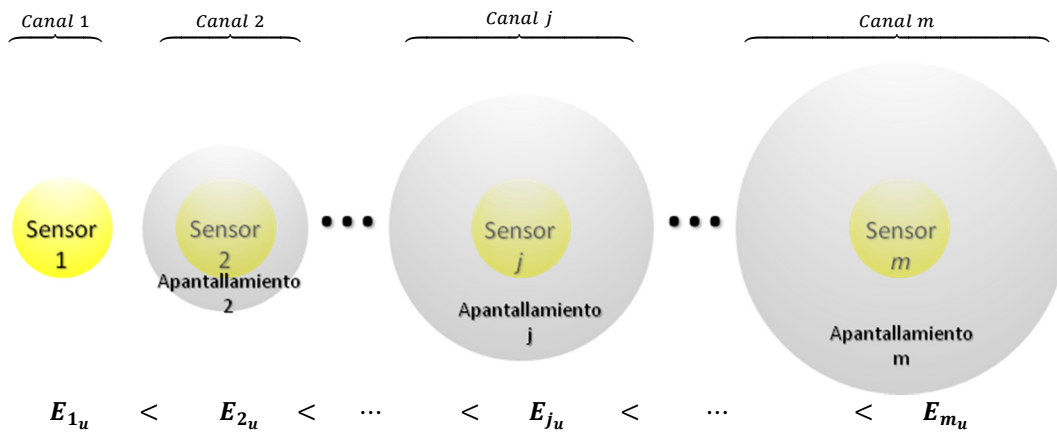


Fig. 2-6. Representación de los  $m$  sensores y de sus blindajes.

La dependencia genérica en el cambio de la corriente de oscuridad con la fluencia de los protones incidentes se expresaría

$$\Delta I^j = \int_0^{\infty} K^j(E) \cdot \Phi(E) \cdot dE \quad 2-18$$

que se puede discretizar en los términos energéticos correspondientes a las energías umbrales del sistema de  $m$  sensores:

$$\left. \begin{aligned} \text{Canal 1} &\rightarrow \Delta I^1 = K_{E_1}^1 \cdot \Phi_{E_1} + K_{E_2}^1 \cdot \Phi_{E_2} + K_{E_3}^1 \cdot \Phi_{E_3} + \dots + K_{E_m}^1 \cdot \Phi_{E_m} \\ \text{Canal 2} &\rightarrow \Delta I^2 = 0 + K_{E_2}^2 \cdot \Phi_{E_2} + K_{E_3}^2 \cdot \Phi_{E_3} + \dots + K_{E_m}^2 \cdot \Phi_{E_m} \\ &\vdots \\ \text{Canal } j &\rightarrow \Delta I^j = 0 + \dots + K_{E_j}^j \cdot \Phi_{E_j} + K_{E_{j+1}}^j \cdot \Phi_{E_{j+1}} + \dots + K_{E_m}^j \cdot \Phi_{E_m} \\ &\vdots \\ \text{Canal } m &\rightarrow \Delta I^m = 0 + 0 + 0 + \dots + K_{E_m}^m \cdot \Phi_{E_m} \end{aligned} \right\} \quad 2-19$$

Al igual que antes, los factores de daño correspondientes a energías inferiores al umbral de cada canal, son nulos y han sido marcados en azul para facilitar su identificación en el sistema de ecuaciones. También se ha remarcado en rojo el término del factor de daño correspondiente a la energía umbral de cada canal.

Una fluencia de protones de un espectro concreto deja un daño característico en el sistema de sensores apantallados progresivamente llamado **firma energética**. Esta firma energética es característica de la fluencia de protones total incidente y de su energía.

En el caso de un entorno mono-energético, la energía umbral del canal más apantallado en el que se observe un efecto indica la energía de los protones incidentes. Una vez conocida la energía de los protones incidentes, supongamos que es  $E_n$ , se podrá calcular la fluencia  $\Phi_{E_n}$  teniendo en cuenta que es un haz mono-energético,

$$\Phi_{E_j} = 0 ; \quad \forall j \neq n, \quad 2-20$$

y por tanto se podrá despejar  $\Phi_{E_n}$  de 2-19 de cualquiera de los canales  $j$  que cumpla que  $j < n$ , ya que en ese caso  $k_{E_{j+i}}^j \neq 0$ :

$$\text{Canal } j \rightarrow \Phi_{E_n} = \frac{\Delta I^j}{k_{E_n}^j} ; \quad \forall j < n \quad 2-21$$

En un caso general con una distribución espectral de protones concreta, la firma energética resultante puede expresarse como una combinación lineal de firmas energéticas individuales. De este modo se podría hacer un tratamiento conjunto del

sistema y buscar la combinación adecuada de las energías que darían un daño igual al observado, y así obtener su **espectro equivalente**.

Partiendo del sistema de ecuaciones mostrado en 2-19 discretizado en la base de energías umbrales, se define el **espectro equivalente** como la combinación de los  $\Phi_{E_j}$  que producen un daño en cada uno de los canales como el observado experimentalmente.

La discretización en las energías umbrales proporciona un sistema triangular de  $m$  ecuaciones (tantas como sensores) y  $m$  incógnitas (tantas como energías umbrales), y por el teorema de Rouché-Frobenius se demuestra que es una condición suficiente para que el sistema sea compatible y determinado.

El sistema 2-19 expresado en forma matricial y particularizando para el caso de ocho sensores ( $m=8$ ) se puede expresar así:

$$\begin{pmatrix} \Delta I^1 \\ \Delta I^2 \\ \Delta I^3 \\ \Delta I^4 \\ \Delta I^5 \\ \Delta I^6 \\ \Delta I^7 \\ \Delta I^8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{E_{1u}}^1 & K_{E_2}^1 & K_{E_3}^1 & K_{E_4}^1 & K_{E_5}^1 & K_{E_6}^1 & K_{E_7}^1 & K_{E_8}^1 \\ 0 & K_{E_{2u}}^2 & K_{E_3}^2 & K_{E_4}^2 & K_{E_5}^2 & K_{E_6}^2 & K_{E_7}^2 & K_{E_8}^2 \\ 0 & 0 & K_{E_{3u}}^3 & K_{E_4}^3 & K_{E_5}^3 & K_{E_6}^3 & K_{E_7}^3 & K_{E_8}^3 \\ 0 & 0 & 0 & K_{E_{4u}}^4 & K_{E_5}^4 & K_{E_6}^4 & K_{E_7}^4 & K_{E_8}^4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{5u}}^5 & K_{E_6}^5 & K_{E_7}^5 & K_{E_8}^5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{6u}}^6 & K_{E_7}^6 & K_{E_8}^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{7u}}^7 & K_{E_8}^7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{8u}}^8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Phi_{E_1} \\ \Phi_{E_2} \\ \Phi_{E_3} \\ \Phi_{E_4} \\ \Phi_{E_5} \\ \Phi_{E_6} \\ \Phi_{E_7} \\ \Phi_{E_8} \end{pmatrix} \quad 2-22$$

De él se puede obtener el espectro equivalente expresado como la combinación lineal de las ocho energías umbrales del sistema. Cada una de ellas correspondiente a la energía umbral de cada uno de sus canales.

A la matriz triangular del sistema la llamaremos **matriz de daño** del sistema, y es característica del tipo de partículas incidentes, de los apantallamientos, de la tecnología sensora, y de la base de energías elegida para discretizar al sistema.

Nótese que se podría usar cualquier otra base de energías no coincidente con las energías umbrales pero, en ese caso, no se tendría por qué obtenerse una matriz triangular y el sistema podría ser indeterminado o incompatible. Los elementos de esta matriz se

obtienen durante la calibración, seleccionando las energías umbrales para ejecutar este ensayo se conseguirá que la matriz de daño sea triangular.

#### 2.1.2.4 Caso IV: Análisis de un apilamiento

Ahora se dará el salto de las situaciones ideales que se han venido describiendo de los sensores de apantallamientos esféricos homogéneos en todas direcciones, a un caso real en donde los sensores están apilados formando una torre como las que se mostraron en la Fig. 2-3 y la Fig. 2-4.

De esta manera, el fotodiodo en la tercera posición, por ejemplo, estará blindado frontalmente por los fotodiodos 1 y 2. Además, es posible añadir una lámina de blindaje extra entre los fotodiodos para modificar dicho blindaje y modular la separación energética de los canales. Este diseño vertical, que aprovecha el propio fotodiodo como blindaje, consigue disminuir el peso total y el volumen del instrumento, además de otorgar cierta direccionalidad.

En el hipotético caso de que todos los protones vengan de frente, podrá ser tratado por medio del sistema de ecuaciones mostrado en la expresión 2-22, en donde a la matriz de daño la llamaremos *matriz de daño frontal*  $M_k^f$ , en la cual la  $f$  del superíndice indica que se refiere a los protones que inciden frontalmente, y que, si se ha discretizado en la base adecuada será triangular:

$$M_k^f = \begin{pmatrix} K_{E_{1u}}^{f1} & K_{E_2}^{f1} & K_{E_3}^{f1} & K_{E_4}^{f1} & K_{E_5}^{f1} & K_{E_6}^{f1} & K_{E_7}^{f1} & K_{E_8}^{f1} \\ 0 & K_{E_{2u}}^{f2} & K_{E_3}^{f2} & K_{E_4}^{f2} & K_{E_5}^{f2} & K_{E_6}^{f2} & K_{E_7}^{f2} & K_{E_8}^{f2} \\ 0 & 0 & K_{E_{3u}}^{f3} & K_{E_4}^{f3} & K_{E_5}^{f3} & K_{E_6}^{f3} & K_{E_7}^{f3} & K_{E_8}^{f3} \\ 0 & 0 & 0 & K_{E_{4u}}^{f4} & K_{E_5}^{f4} & K_{E_6}^{f4} & K_{E_7}^{f4} & K_{E_8}^{f4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{5u}}^{f5} & K_{E_6}^{f5} & K_{E_7}^{f5} & K_{E_8}^{f5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{6u}}^{f6} & K_{E_7}^{f6} & K_{E_8}^{f6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{7u}}^{f7} & K_{E_8}^{f7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{E_{8u}}^{f8} \end{pmatrix} \quad 2-23$$

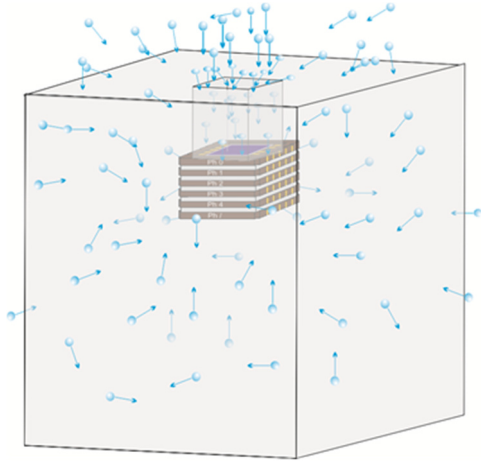


Fig. 2-7. Representación de una torre de fotodiodos rodeada de un blindaje lateral y trasero.

En un caso general en el que la torre reciba protones de todas direcciones (Fig. 2-7), el efecto sobre cada uno de los pisos o canales no solo dependerá de la radiación frontal y de la matriz triangular del daño frontal. En este caso se encontrarán factores laterales y traseros. El daño producido en el fotodiodo del piso  $j$  depende de todos ellos, de los factores de daño de la radiación frontal, de la radiación trasera y de la radiación lateral, y puede expresarse como la suma de todas las contribuciones:

$$\Delta I^j = \underbrace{\sum_{i=1}^n K_{E_i}^{fj} \cdot \Phi_{E_i}^f}_{\text{Efecto frontal}} + \underbrace{\sum_{i=1}^o K_{E_i}^{Tj} \cdot \Phi_{E_i}^T}_{\text{Efecto trasero}} + \underbrace{\sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^q K_{E_i}^{Lj\theta^l} \cdot \Phi_{E_i}^{L\theta^l}}_{\text{Efecto lateral}} \quad 2-24$$

en donde  $n = o$  si se usan las energías umbrales de los pisos. En general, y en este caso también, debe tenerse en cuenta que  $K_{E_i}^{fj} \neq K_{E_i}^{Tj}$ , ya que la energía umbral de los protones que inciden frontalmente no es la misma que los que inciden desde atrás.

La radiación lateral influye de forma diferente según el ángulo de incidencia, es por eso que el efecto lateral de la expresión 2-24 tiene dos sumatorios, uno indica que de cada dirección incide una fluencia diferente ( $l$ ) y el otro indica que el efecto sobre el sensor no es el mismo ( $i$ ). Este daño lateral depende del ángulo por diversas razones, una es que el apantallamiento no es esférico y el camino recorrido por un protón al atravesar el blindaje depende del coseno del ángulo tal y como se muestra en la Fig. 2-8, otra está relacionada con el área efectiva del propio sensor, y otra sería la relaciona con el recorrido del protón a lo largo del dispositivo.

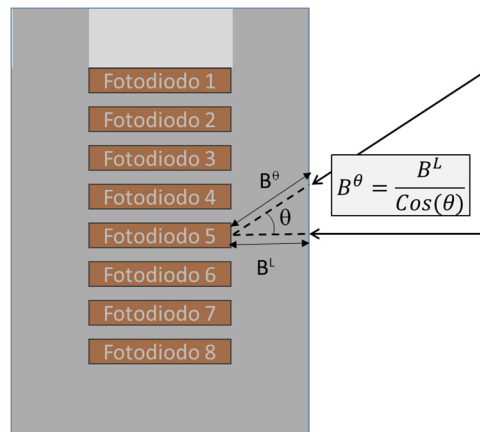


Fig. 2-8. Diagrama de la dependencia del blindaje lateral con el ángulo

## 2.2 Verificación experimental del principio de funcionamiento

La verificación del principio de funcionamiento de los efectos de la radiación sobre un apilamiento de sensores tuvo dos fases. El objetivo de la primera fase fue verificar que el efecto de pérdida de energía de los protones al ir pasando de un piso al siguiente se podría medir y distinguir de forma clara. En la segunda fase se trató de evaluar la problemática de la ejecución de una calibración para la obtención de los valores de la matriz de daño frontal. Los resultados obtenidos se han usado también para la evaluación de diferentes tipos de apilamientos y estimar cual tiene un comportamiento más adecuado para implementarlo en LDT.

Todos los apilamientos probados estaban formados por fotodiodos S5106<sup>3</sup>, y el efecto medido fue el aumento de la corriente de oscuridad que dicho fotodiodo sufre por acumulación de DD. Se decidió hacer la verificación con la corriente de oscuridad de los fotodiodos porque el montaje experimental es mucho más sencillo que en el caso de haber usado la pérdida de potencia óptica del LED. Con los LED hubiera sido necesario combinar fotodiodos y LED cuidando el alineamiento entre ellos, y las complicaciones hubieran sido mayores.

En el caso de los fotodiodos, un detalle a tener en cuenta fue el de evitar que no incidiera luz sobre su área activa. En todas las configuraciones probadas hay un fotodiodo dado la vuelta respecto del resto, el del extremo, el cual quedaría con su área activa hacia fuera en caso contrario. Este fotodiodo fue montado así para evitar precisamente que recibiera luz del exterior y afectara a las medidas de la corriente de oscuridad. La Fig. 2-9 muestra 3 tres de los cinco apilamientos montados. La diferencia entre unos apilamientos y otros reside en la inclusión de un blindaje extra de aluminio entre fotodiodo y fotodiodo, en la posición de montaje

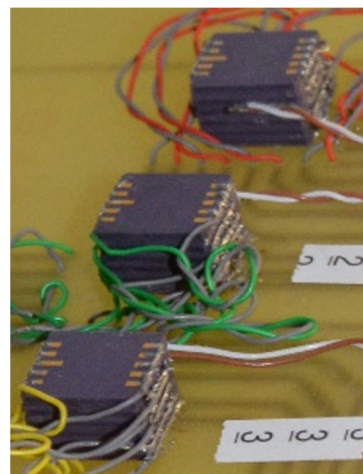


Fig. 2-9. Tres apilamientos de fotodiodos usados para la verificación del principio de funcionamiento: LDT-9-0-T\_1, LDT-9-0-T\_2 (2) y LDT-9-0-F\_3 [Tabla 2-1.]

<sup>3</sup> Se usó el fotodiodo S5106 de *Hamamatsu* porque era uno de los candidatos seleccionados para su uso en LDT como se verá en §4.1



de los fotodiodos y en el número de fotodiodos montados. La Tabla 2-1 indica las características de estos apilamientos.

Tabla 2-1. Irradiaciones para verificación del principio de funcionamiento y selección de la estructura adecuada.

Apilamiento	Nº de fotodiodos	Espesor de blindaje de aluminio [mm]	Montaje
LDT-9-0.5-T_1	9	0,5	Trasero
LDT-9-0.5-F_2	9	0,5	Frontal
LDT-6-0-T_1	6	0	Trasero
LDT-6-0-T_2	6	0	Trasero
LDT-6-0-F_3	6	0	Frontal

El montaje trasero o frontal indica la orientación de los fotodiodos. Los apilamientos frontales tienen todos los fotodiodos con su área activa dirigida hacia la fuente de radiación (todos excepto el primero, que está dado la vuelta). Los apilamientos traseros se montaron justo al revés. Como el fotodiodo del final tiene siempre el área activa protegida, el aspecto externo de los apilamientos es en todos el mismo. Es por eso que las tres torres de fotodiodos de la Fig. 2-9 parecen idénticas, pero en realidad hay dos montajes “traseros” y uno “frontal”.

Para la primera fase se realizó un ensayo, octubre de 2006, en la instalación de irradiación de protones (PIF – *Proton Irradiation Facility*) del *Paul Scherrer Institut* (PSI) en Suiza. Este ensayo se realizó con los dos apilamientos de nueve fotodiodos S5106. En la segunda fase, febrero de 2007, se probaron también los tres apilamientos de 6 detectores. En la tabla 2-2 se especifican las características de las dos irradiaciones.

Tabla 2-2. Irradiaciones con protones para la verificación del principio de funcionamiento

Código Irradiación	Fecha	Instalación	Rango de energías [MeV]	Flujo ( $\Phi$ ) [ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ] $\times 10^5$	Fluencia ( $\Phi$ ) [ $\text{cm}^{-2}$ ] $\times 10^9$	Apilamientos Irradiados
#1LDT	23-10-06	PIF-PSI	(30 – 63)	~ 50	~ 3	LDT-9-0.5-F_2 LDT-9-0.5-T_1
#2LDT	14-2-07	PIF-PSI	(11 – 63)	~ 5	~ 4	LDT-9-0.5-F_2 LDT-9-0.5-T_1 LDT-6-0-T_1 LDT-6-0-T_2 LDT-6-0-F_3

En los siguientes dos apartados se describen y muestran los resultados de cada una de estas dos irradiaciones.

### 2.2.1 Primera fase: irradiación de apilamientos de sensores – Efectos observables

La primera fase de la verificación del principio de funcionamiento se llevó a cabo durante la irradiación #1LDT (tabla 2-2). Su objetivo era comprobar el efecto del apantallamiento progresivo de una estructura de sensores apilados, descrito en la sección anterior (§2.1). Para esta verificación se irradió una tarjeta con dos apilamientos de fotodiodos, el LDT-9-0.5-T\_1 y el LDT-9-0.5-F\_2 (Tabla 2-1), a cuatro energías distintas mostradas en la Tabla 4-10, en donde también se dan las características de cada uno de los pasos de la irradiación. En la §3.3.3.1 del capítulo de técnicas experimentales se dan más detalles de este ensayo.

Tabla 2-3. Resumen de los pasos de irradiación durante la caracterización del factor de daño de los apilamientos de 9 elementos (LDT-9-0.5-F-2 y LDT-9-0.5-T-1)..

Paso de Irradiación	Energía [MeV]	Fluencia ( $\Phi$ ) [cm <sup>-2</sup> ] $\times 10^8$	Flujo ( $\phi$ ) [cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] $\times 10^5$
1	30,29	5,50	~ 50
2	39,92	5,13	
3	49,85	5,19	
4	62,51	5,11	

Durante el ensayo se caracterizó la corriente de oscuridad y se evaluó su aumento por unidad de fluencia, para calcular el llamado factor de daño. Se obtuvo el factor de daño para cada uno de los pisos de todos los apilamientos irradiados, a cada una de las energías de irradiación. La Fig. 2-10 muestra el valor del factor de daño del paso 2 de irradiación (~40 MeV). Esta figura representa la llamada firma energética de esta energía de irradiación:

Los resultados observados demuestran que los efectos del apantallamiento progresivo descrito en la sección anterior se pueden medir y son como se esperaban:

- Los pisos que están más expuestos (del piso 1 al 5) resultan dañados. Estos pisos tienen una energía umbral inferior o igual a los ~40 MeV de la irradiación.
- Los no expuestos no sufren ningún efecto (del piso 6 al piso 9). El blindaje frena completamente los protones y ninguno llega a incidir sobre los fotodiodos. Estos pisos tienen una energía umbral superior a los ~40 MeV de la irradiación.
- Del conjunto de pisos que han resultado dañados, el factor de daño es mayor cuanto más apantallado está el piso, es decir, el piso 5 se daña más que el piso 1. Esto es consecuencia directa del NIEL ya que a mayor apantallamiento más

energía pierden los  $p^+$  antes de llegar al piso, y por tanto menor energía tienen cuando lo alcanzan. Como las energías menores conllevan mayor NIEL (Fig. 1-13), la energía depositada y el daño producido son mayores.

- Interesa señalar que el valor de los factores de daño obtenidos aquí son del mismo orden que los obtenidos durante la etapa de selección y la caracterización de dispositivos sensores para LDT (§4.1.3 y §4.3.1).

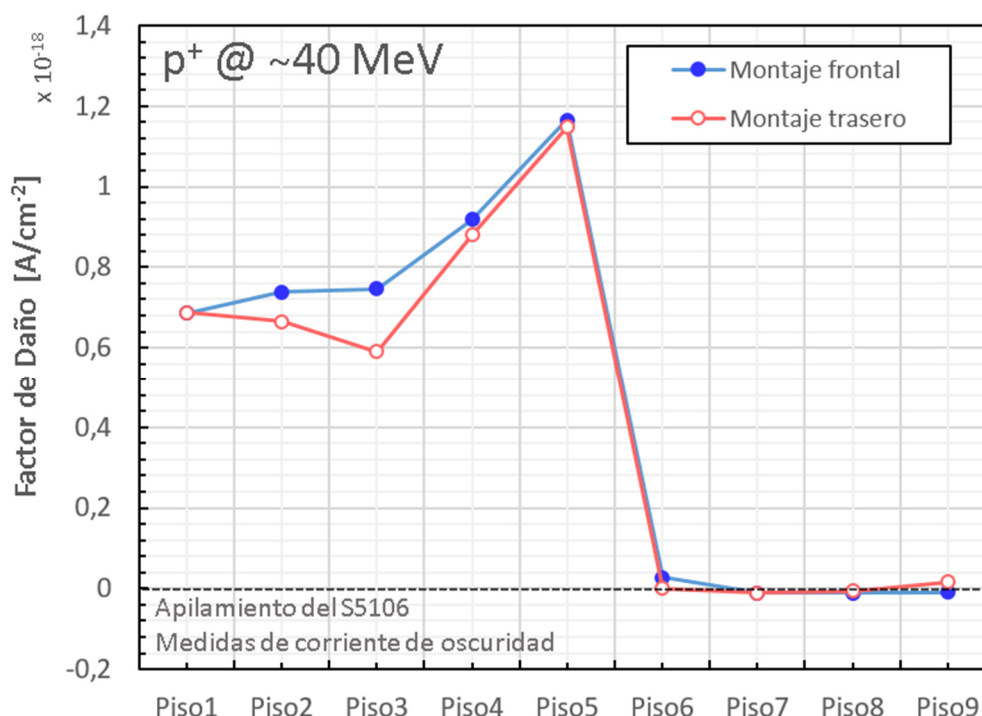


Fig. 2-10. Firmas energéticas de los protones de  $\sim 40$  MeV sobre el apilamiento 1 (irradiación trasera) y el apilamiento 2 (irradiación frontal) obtenidas en el paso 2 de la irradiación #1LDT

En la Fig. 2-11 se representan todas las firmas energéticas de ambos apilamientos. Se ha marcado en la gráfica la energía de irradiación de cada una de las líneas representadas para facilitar su identificación. Las líneas de los apilamientos de irradiación frontal están en colores azules y todas las de irradiación trasera en tonos rojos, anaranjados y amarillos.

En una primera inspección se aprecia como la energía más baja ( $\sim 30$  MeV) solo penetra hasta el piso 3, la de  $\sim 40$  MeV hasta el piso 5, la de  $\sim 50$  MeV hasta el 7, y la de  $\sim 63$  MeV llega a todos. En un análisis más detallado se observa que en el apilamiento montado frontalmente, para la energía de  $\sim 30$  MeV, los  $p^+$  no se han frenado completamente en el piso 3. Esto indica que  $\sim 30$  MeV es una energía superior a la energía umbral del piso 3, pero inferior a la umbral del piso 4. Lo mismo sucede en el caso de  $\sim 40$  MeV con el piso 5 del apilamiento montado frontalmente.

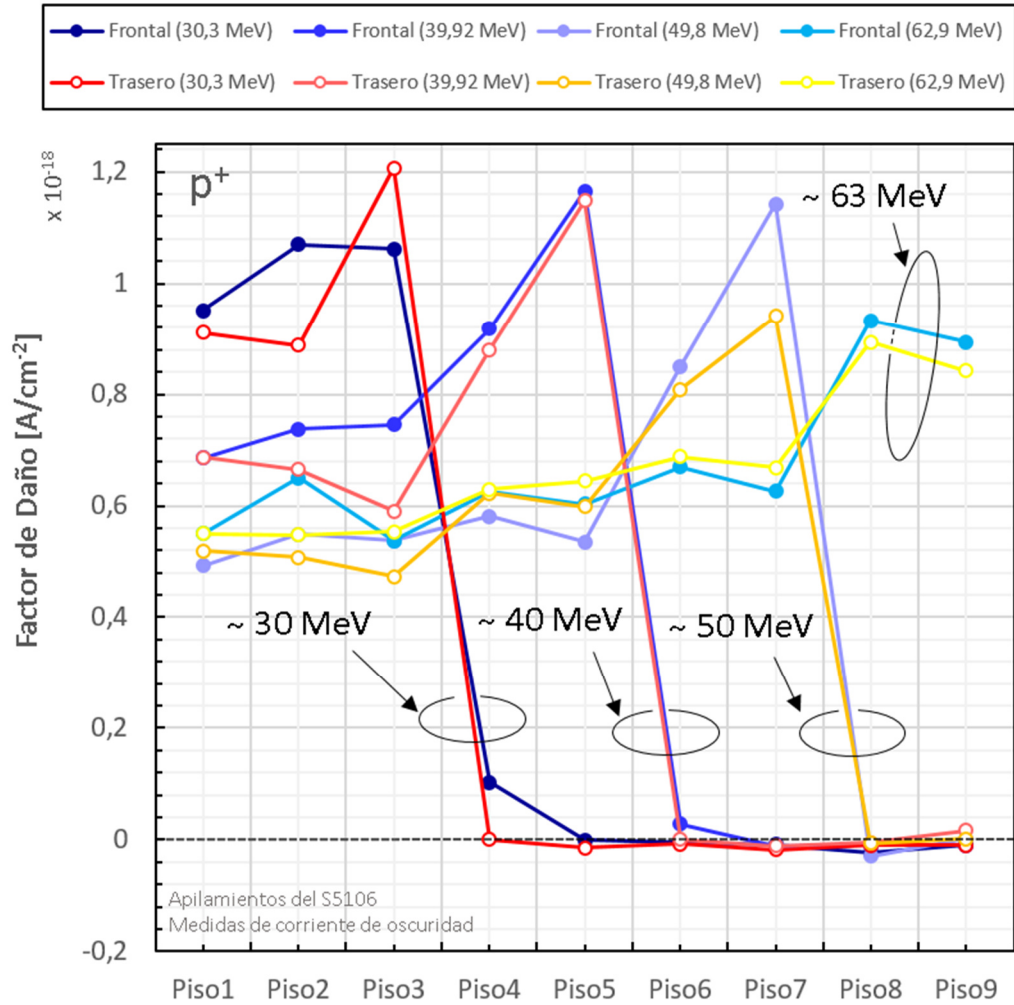


Fig. 2-11. Firmas energéticas de los apilamientos irradiados en el ensayo #1LDT para la verificación del principio de funcionamiento

Los valores representados se pueden ordenar en una matriz de datos con tantas filas como energías se han evaluado, y tantas columnas como pisos en la torre. Cada elemento de esta matriz contiene el factor de daño de un determinado piso al ser irradiado con un haz de protones de una determinada energía. En este caso concreto se obtiene una matriz con 9 columnas y 4 filas, es decir, de 36 elementos. Con el fin de favorecer el análisis, estos valores se han normalizado al más alto, y se han sustituido sus valores numéricos por colores de tal forma que el color rojo corresponde a los valores más altos (cerca del 100%), los naranjas son los valores del 75%, los amarillos del 50% y los verdes representan valores que decaen hasta el 0%. En las Fig. 2-12 y Fig. 2-13 se observa de un vistazo a qué energías los pisos se ven afectados por la radiación: las zonas verdes son las zonas apantalladas y las más rojas las que tienen el factor de daño más alto. La transición entre el verde y el rojo señala el valor aproximado de la energía umbral.

Energía del haz [MeV]	Irradiación #1LDT - Torre 2 (LDT-9-0.5-F-2) Irradiación frontal									Factor de daño [Normalizado]
	Piso1	Piso2	Piso3	Piso4	Piso5	Piso6	Piso7	Piso8	Piso9	
~ 30										100%
~ 40										75%
~ 50										50%
~ 63										25%
										0%

Fig. 2-12. Representación cromática de la matriz de factores de daño del apilamiento LDT-9-0.5-F-2 ensayado durante la irradiación #1LDT

Energía del haz [MeV]	Irradiación #1LDT - Torre 1 (LDT-9-0.5-T-1) Irradiación trasera									Factor de daño [Normalizado]
	Piso1	Piso2	Piso3	Piso4	Piso5	Piso6	Piso7	Piso8	Piso9	
~ 30										100%
~ 40										75%
~ 50										50%
~ 63										25%
										0%

Fig. 2-13. Representación cromática de la matriz de factores de daño del apilamiento LDT-9-0.5-T-1 ensayado durante la irradiación #1LDT

Cada una de las matrices representadas es una matriz de daño del sistema de ecuaciones que describe el apilamiento bajo irradiación frontal (ecuación 2-23). En el caso de ser triangular el sistema de ecuaciones es compatible y determinado. En este caso tienen la forma adecuada, y solo faltaría añadir energías intermedias para obtener un sistema  $9 \times 9$ , con tantas filas como columnas. También habría que conseguir irradiar con las energías umbrales, y no con energías intermedias entre la umbral de un piso y el siguiente (como ha sucedido con el apilamiento frontal al irradiar con ~30 MeV y con ~40 MeV). Para minimizar este efecto, el primer paso de cualquier campaña de calibración deberá ser la búsqueda de las energías del acelerador que más se aproximan a las energías umbrales de cada piso, es decir, las energías que generen el máximo daño en un piso sin afectar al siguiente.

### 2.2.2 Segunda fase: caracterización de los efectos – Matriz de daño

En la segunda fase realizada durante la campaña de irradiación #2LDT (Tabla 2-2) se caracterizaron diversos apilamientos de fotodiodos. Los objetivos perseguidos fueron los siguientes:

- Identificación de problemas que podrían surgir durante la ejecución o interpretación de los datos de la calibración del modelo de vuelo (FM – *Flight Model*) de LDT, antes de la integración en el satélite.
- Seleccionar el tipo de apilamiento más adecuado para LDT.

Por motivos inherentes a las características de la instalación y al procedimiento de cambio de energía de haz, no fue posible realizar la búsqueda completa de las energías umbral. Se usaron las energías de “implementación rápida” entre las disponibles. La instalación del PSI donde se realizó la irradiación permite seleccionar un gran número de energías, pero no todas ellas se pueden configurar de la misma forma; el cambio entre algunas de ellas es casi inmediato, pero hay otras que requieren un procedimiento más largo y delicado que impidió disponer del tiempo necesario para poder seleccionarlas. Este hecho fue un factor importante a tener en cuenta para la calibración del FM. Al final se usaron 8 energías distintas, un único flujo y pasos de fluencia iguales, cinco pasos por energía. La irradiación se dividió en dos, primeros se irradiaron los apilamientos de 9 elementos (pasos de irradiación del 1 al 40) y después los apilamientos de 6 elementos (pasos del 41 al 85), en ambos casos las condiciones de irradiación fueron iguales. Un resumen de estas condiciones de irradiación se muestra en la tabla 2-4 para ambos casos.

Tabla 2-4. Resumen de los pasos de irradiación durante la caracterización del factor de daño de los apilamientos de 9 elementos (LDT-9-0.5-F-2 y LDT-9-0.5-T-1) y de 6 elementos (LDT-6-0-T\_1, LDT-6-0-T\_2 y LDT-6-0-F\_1) en la irradiación #2LDT.

Paso de Irradiación		Energía	Fluencia media por paso ( $\Phi$ )	Flujo ( $\phi$ )
Apilamiento de 9 elementos	Apilamiento de 6 elementos	[MeV]	[cm <sup>-2</sup> ] $\times 10^8$	[cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ] $\times 10^5$
1-5	41-45	10,76	~ 1	~ 5
6-10	46-50	14,59		
11-15	51-55	20,53		
16-20	66-70	25,39		
21-25	71-75	30,29		
26-30	76-80	39,92		
30-35	81-85	49,85		
36-40	86-90	62,51		

Para calcular el factor de daño de cada energía, se hicieron 5 pasos de irradiación. En cada uno de ellos se acumuló la misma fluencia irradiando un tiempo fijo a un flujo fijo. El valor de la corriente de oscuridad en función de la fluencia acumulada forma una línea recta cuya pendiente es el factor de daño. Un ejemplo de la evolución de la corriente de oscuridad y del ajuste lineal se muestra en la Fig. 2-14.

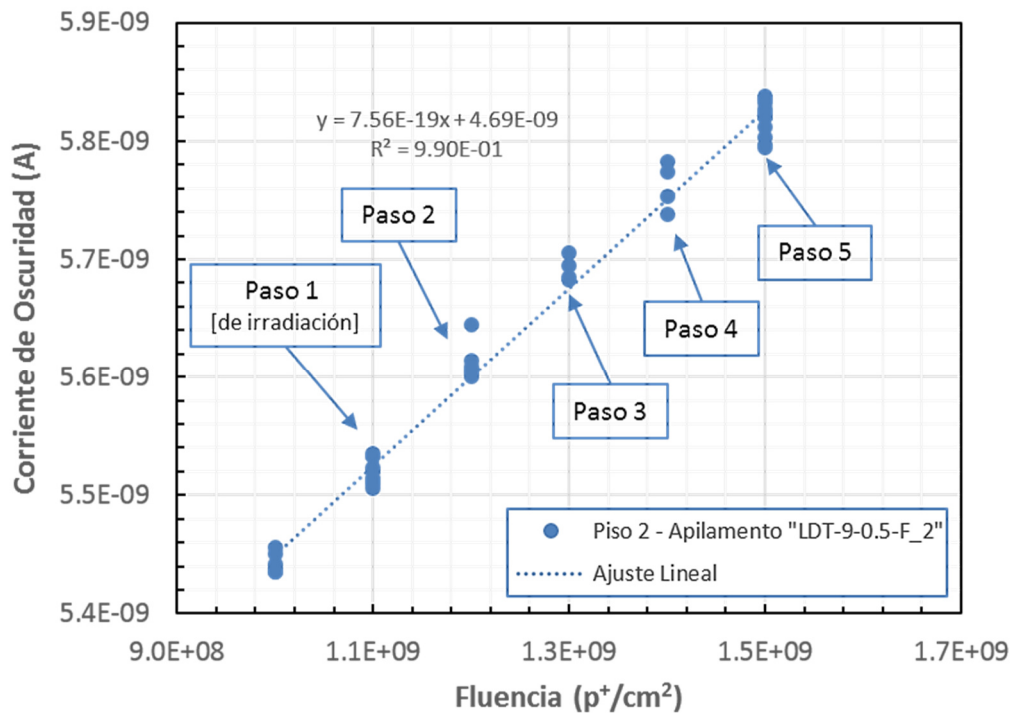


Fig. 2-14. Corriente de oscuridad del piso 2 de la “LDT-9-0.5-F\_2” durante la irradiación con 20 MeV en la irradiación #2LDT. La línea azul punteada es el ajuste lineal cuya pendiente es el factor de daño

Se comienza analizando los resultados de los apilamientos de 9 elementos ordenando todos los factores de daño en una matriz  $8 \times 9$  y representando sus valores con el mismo código de colores introducido anteriormente (Fig. 2-15 y Fig. 2-16). Se han introducido, en algunas celdas, unas flechas hacia arriba ( $\uparrow$ ) para indicar cuando ha habido déficit de energía en la determinación de una energía umbral, en esos casos habría sido necesario irradiar con una energía superior. Las flechas hacia abajo ( $\downarrow$ ) indican que hubiera sido necesario irradiar con una energía menor.

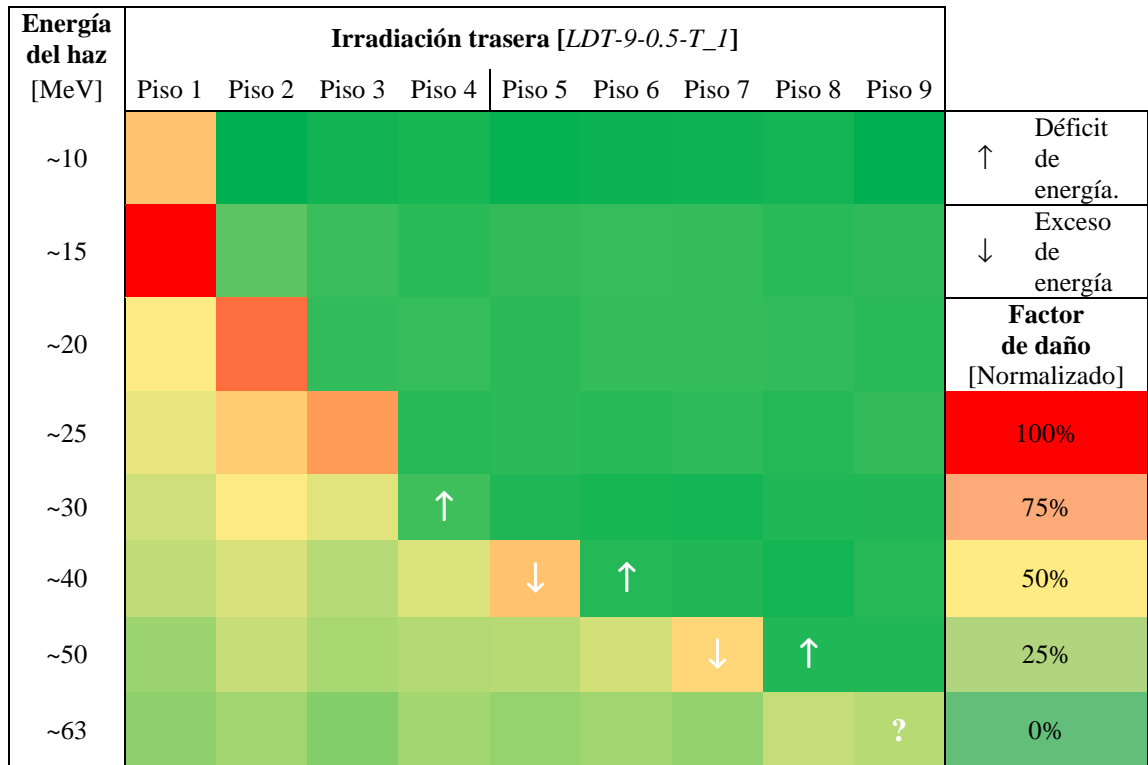


Fig. 2-15. Representación cromática de la matriz de factores de daño del apilamiento LDT-9-0.5-F\_2 (Torre 2) obtenida durante la irradiación #2LDT

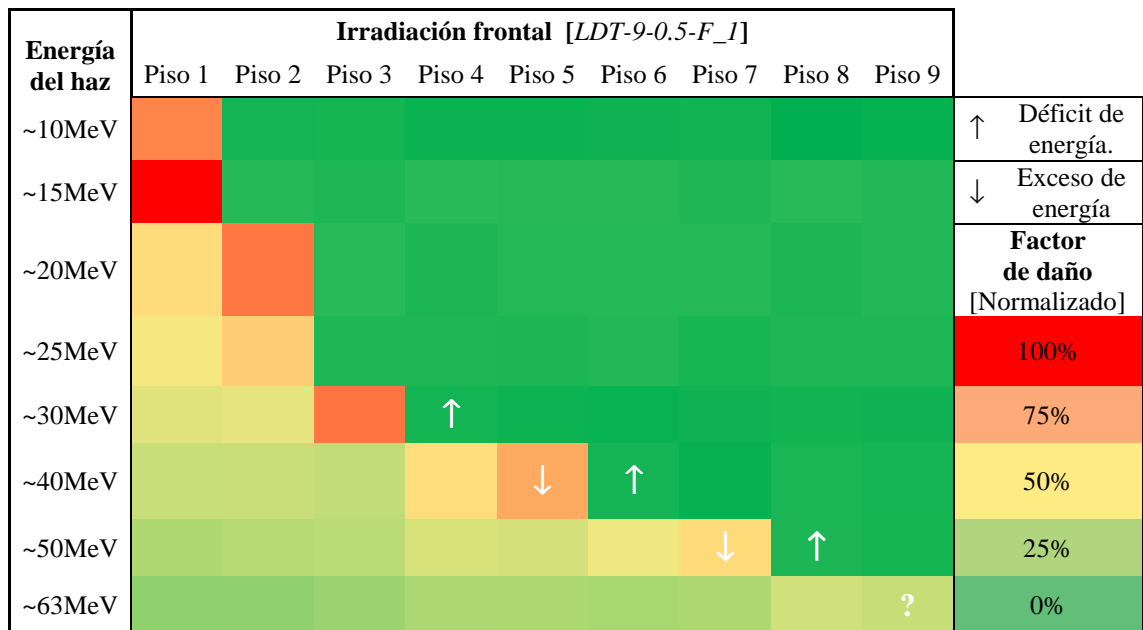


Fig. 2-16. Representación cromática de la matriz de factores de daño del apilamiento LDT-9-0.5-T\_1 (Torre 1) obtenida durante la irradiación #2LDT

Es interesante reseñar que basándose en los resultados obtenidos, la torre irradiada por su parte posterior muestra energías umbrales ligeramente mayores que la torre irradiada frontalmente. La explicación a esta diferencia reside en el hecho de que en la torre irradiada por la parte de atrás los protones tienen que atravesar la parte trasera del



encapsulado del fotodiodo, cosa que no sucede con la torre que se irradia frontalmente. Este efecto queda reflejado en la Fig. 2-17 en la que se comparan los factores de daño de del apilamiento de irradiación frontal y el apilamiento de irradiación trasera a 25 MeV. En esta figura se ve como la línea roja (irradiación trasera) muestra un factor de daño de 0 en el piso 3, mientras que la línea azul (irradiación frontal) muestra un factor de daño elevado en ese mismo piso.

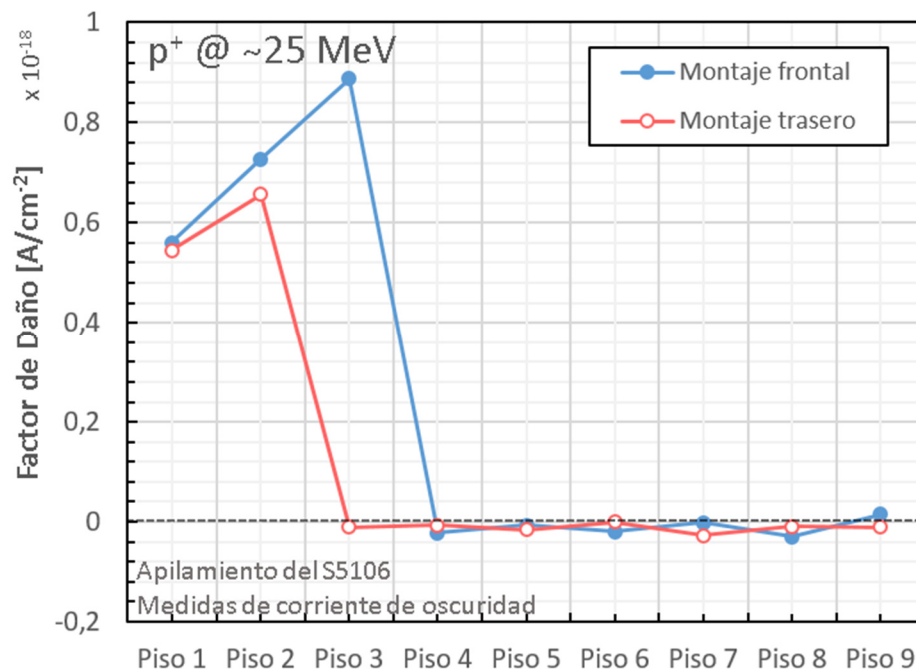


Fig. 2-17. Discrepancia entre los factores de daño del apilamiento de irradiación frontal y el de irradiación trasera [Irradiación con  $p^+$  de ~25 MeV]

En la Fig. 2-18 se compara el efecto entre ambos apilamientos al irradiar con ~30 MeV, sucede algo parecido que con la energía de ~25 MeV, pero al contrario: en la irradiación frontal, la energía de ~30 MeV pasa del piso 3 y llega a afectar ligeramente el piso 4. Esta energía es demasiado alta para el piso 3, pero demasiado baja para el piso 4. En cambio, con la torre de montaje trasero, esa misma energía es la energía umbral del piso 3, y provoca en él un daño máximo.

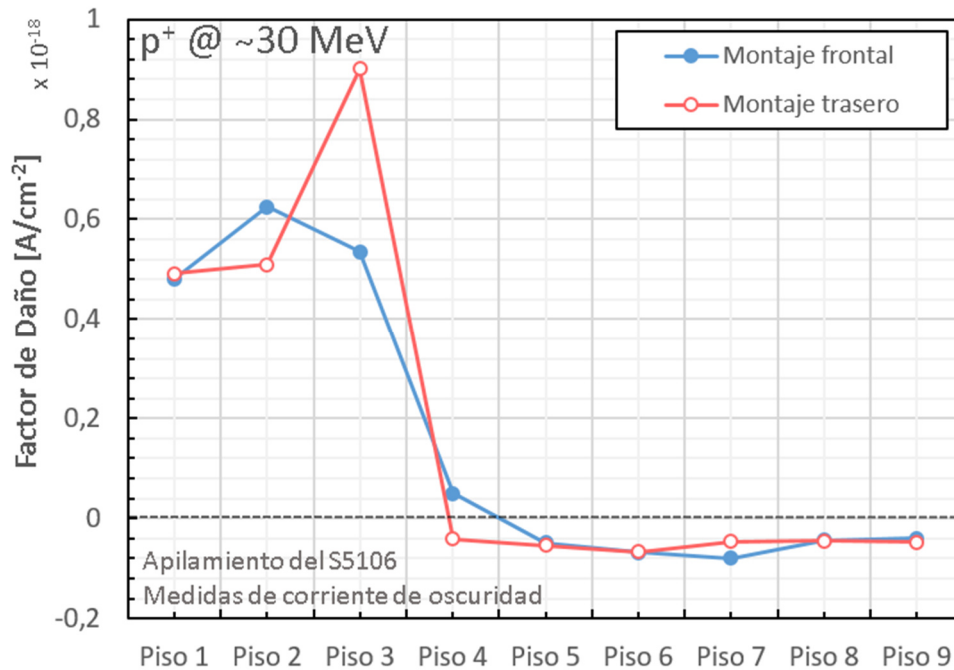


Fig. 2-18. Discrepancia del factores de daño entre el apilamiento irradiación frontal y en irradiación trasera [Irradiación con  $p^+$  de  $\sim 30$  MeV]

Es decir, variaciones de la energía de los protones de 5 MeV hacen que la respuesta cambie sustancialmente en los pisos cuya energía umbral es cercana a la de irradiación, esto deja de manifiesto la importancia de los blindajes entre pisos y la conveniencia de obtener las energías disponibles en el acelerador que más se asemejan a la energía umbral de cada piso del apilamiento.

Recapitulando, entre los resultados vistos en estos dos apilamientos de 9 elementos, interesa destacar que:

- El haz de 10,76 MeV (la energía más baja del acelerador) es inferior a la energía umbral del piso 1. Para reducir la energía umbral de este primer piso se debe poner el área activa expuesta hacia el haz de protones y no con el fotodiodo dado la vuelta.
- Las energías de 25 MeV y 30 MeV no afectan por igual a ambos apilamientos: el irradiado frontalmente y el irradiado desde atrás.
- Los pisos 4, 5, 6, 7 y 8 no han sido irradiados con sus energías umbral. Ha faltado energías intermedias entre 30, 40, 50 y 63 MeV.
- No queda claro si la energía del haz de protones de 63 MeV es la más cercana a la energía umbral del piso 9, o por el contrario es demasiado alta.

Se pasa ahora a analizar los resultados de la irradiación de los apilamientos de 6 pisos, para ello se muestran las matrices de daño en la en la Fig. 2-19 y la Fig. 2-20 con la representación cromática que se ha definido anteriormente.

Energía del haz	LDT-6-0-T_1						LDT-6-0-T_2						Factor de daño [%]
	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	
~10MeV													
~15MeV													
~20MeV													
~25MeV													100%
~30MeV													75%
~40MeV						↓						↓	50%
~50MeV						↓						↓	25%
~63MeV						↓						?	0%

Fig. 2-19. Representación cromática de las matrices de factores de daño del apilamiento LDT-6-0-T\_1 (torre 1) y LDT-6-0-T\_2 (torre 2) obtenida durante la irradiación #2LDT

Energía del Haz	LDT-6-0-F_1						Factor de daño [%]
	Piso1	Piso2	Piso3	Piso4	Piso5	Piso6	
~10MeV							
~15MeV							
~20MeV							
~25MeV							100%
~30MeV							75%
~40MeV						↓	50%
~50MeV						↓	25%
~63MeV						↓	0%

Fig. 2-20. Representación cromática de la matriz de factores de daño del apilamiento LDT-6-0-F\_3 (torre 3) obtenida durante la irradiación #2LDT

Los resultados de este ensayo muestran otra serie de fenómenos que también interesa tener en cuenta:

- Los datos de la irradiación de 10 MeV han sido enmascarados por variaciones térmicas. Para evitarlo es necesario introducir en el búnker el sistema a irradiar, antes de iniciar la irradiación, con tiempo suficiente para que alcance el equilibrio térmico.
- La energía de ~40 MeV fue suficiente para atravesar 6 pisos en el apilamiento sin apantallamiento extra, pero en los apilamientos con 0,5 mm de aluminio entre pisos, solo se atravesaron 5.
- Con las energías usadas en esa ocasión, no se encontraron diferencias apreciables entre la torre irradiada por delante de la irradiada por detrás.

## 2.3 Modelo de LDT

En esta sección se va a trabajar con el modelo presentado en la descripción del principio de funcionamiento, particularizándolo en el caso concreto de LDT. Se van a distinguir dos casos, el caso general en el que no se incluye ninguna aproximación en la distribución angular de partículas, y el caso isotrópico en el que se justificará por qué en LDT se puede trabajar bajo la suposición de una incidencia angular homogénea de partículas.

### 2.3.1 Caso general

Partiendo de la ecuación 2-24 se aplicarán ciertas hipótesis y aproximaciones válidas para el caso de LDT, en donde el efecto de los protones que inciden frontalmente (protones frontales), como los que inciden desde atrás (protones traseros), se puede describir con  $m$  elementos, cada uno de ellos correspondiente a la energía umbral de los pisos del apilamiento:  $m$  energías umbrales frontales ( $n=m$ ) y  $m$  energías umbrales traseras ( $o=m$ ). En general, las energías umbrales delanteras son diferentes a las traseras, aunque cumplen cierta simetría que podrá ser aprovechada bajo ciertas hipótesis.

Para simplificar la matriz lateral, se puede seleccionar  $r$  ángulos y expresar todo el efecto lateral como una combinación lineal de ellos. Se usarán las energías umbrales de cada uno de los ángulos para la discretización.

Con estas simplificaciones se puede reescribir la expresión 2-24 de este modo simplificado, donde  $m$  será el número de pisos y  $r$  el número de direcciones contempladas para el efecto lateral:

$$\Delta I^j = \underbrace{\sum_{i=1}^m K_{E_i}^{fj} \cdot \Phi_{E_i}^f}_{\text{Efecto frontal}} + \underbrace{\sum_{i=1}^m K_{E_i^T}^{Tj} \cdot \Phi_{E_i}^T}_{\text{Efecto trasero}} + \underbrace{\sum_{i=1}^r K_{E_i^L}^{L\theta^j} \cdot \Phi_{E_i}^{L\theta^j}}_{\text{Efecto lateral}} \quad 2-25$$

Es decir, que la matriz del sistema es:

$$M_k = \begin{pmatrix} K_{E_{1u}}^{f1} & K_{E_2}^{f1} & \dots & K_{E_m}^{f1} & K_{E_1^T}^{T1} & 0 & \dots & 0 & K_{E_1^L}^{L\theta^1} & K_{E_2^L}^{L\theta^2} & \dots & K_{E_r^L}^{L\theta^r} \\ 0 & K_{E_{2u}}^{f2} & \dots & K_{E_m}^{f2} & K_{E_1^T}^{T2} & K_{E_2^T}^{T2} & \dots & 0 & K_{E_1^L}^{L\theta^1} & K_{E_2^L}^{L\theta^2} & \dots & K_{E_r^L}^{L\theta^r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_m}^{fm} & K_{E_1^T}^{Tm} & K_{E_2^T}^{Tm} & \dots & K_{E_m^T}^{Tm} & K_{E_1^L}^{L\theta^1} & K_{E_2^L}^{L\theta^2} & \dots & K_{E_r^L}^{L\theta^r} \end{pmatrix} \quad 2-26$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Efecto FRONTAL}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Efecto TRASERO}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Efecto LATERAL}}$

Los elementos de esta matriz (los factores de daño frontal, traseros y laterales a diferentes ángulos) se obtienen experimentalmente durante la calibración. El número de elementos frontales y traseros en LDT es de 8 ( $m=8$  pisos) y en el caso lateral se fija un numero de direcciones representativo, en este caso:  $r=12$ .

Es decir, se obtiene un sistema de 8 ecuaciones y 28 incógnitas:

$$\begin{pmatrix} \Delta I^1 \\ \Delta I^2 \\ \Delta I^3 \\ \Delta I^4 \\ \Delta I^5 \\ \Delta I^6 \\ \Delta I^7 \\ \Delta I^8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{E_1}^{f1} & \dots & K_{E_8}^{f1} & K_{E_1^T}^{T1} & \dots & 0 & K_{E_1^L}^{L\theta^1} & \dots & K_{E_{12}^L}^{L\theta^{12}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & K_{E_8}^{f8} & K_{E_1^T}^{T8} & \dots & K_{E_8^T}^{T8} & K_{E_1^L}^{L\theta^1} & \dots & K_{E_{12}^L}^{L\theta^{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{E_1}^f \\ \Phi_{E_2}^f \\ \vdots \\ \Phi_{E_8}^f \\ \Phi_{E_1}^T \\ \Phi_{E_2}^T \\ \vdots \\ \Phi_{E_8}^T \\ \Phi_{E_1}^{L\theta^1} \\ \Phi_{E_2}^{L\theta^2} \\ \vdots \\ \Phi_{E_{12}}^{L\theta^{12}} \end{pmatrix} \quad 2-27$$

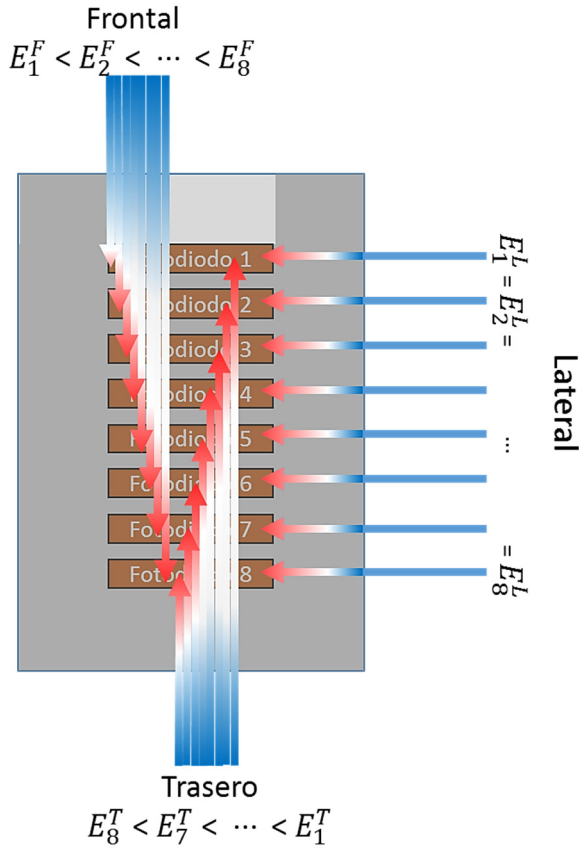


Fig. 2-21. Esquema de las energías umbrales en incidencia frontal, lateral y a una de los ángulos laterales. El color rojo significa máximo daño producido.

En este sistema, la energía  $E_1^F$  es la energía umbral del piso 1, cuando las partículas inciden frontalmente.  $E_1^T$  es la energía umbral del piso 1, cuando las partículas inciden desde la parte trasera.  $E_1^F < E_1^T$ , pues el blindaje del piso 1 es menor frontalmente que desde atrás. Las energías laterales son, en primera aproximación y suponiendo que la estructura es perfectamente homogénea, iguales en todos los pisos. La Fig. 2-21 es un esquema de las energías delanteras, traseras y la perpendicular lateral. Bajo este supuesto se puede asumir que el efecto lateral de la radiación será aproximadamente el mismo en

todos los pisos. Y todo el término lateral del sumatorio de la expresión 2-25 se podrá expresar como un término único debido a la fluencia equivalente lateral de forma global:

$$\Delta I^j = \overbrace{\sum_{i=1}^m K_{E_i}^{fj} \cdot \Phi_{E_i}^f}^{\text{Efecto frontal}} + \overbrace{\sum_{i=1}^m K_{E_i}^{Tj} \cdot \Phi_{E_i}^T}^{\text{Efecto trasero}} + \overbrace{K_{E_L}^L \cdot \Phi_{eq. E_L}^L}^{\text{Efecto lateral}} \quad 2-28$$

Así se ha conseguido reducir el número de incógnitas a 17. Expresando 2-28 matricialmente se tiene:

$$\begin{pmatrix} \Delta I^1 \\ \Delta I^2 \\ \Delta I^3 \\ \Delta I^4 \\ \Delta I^5 \\ \Delta I^6 \\ \Delta I^7 \\ \Delta I^8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{E_1}^{f1} & \dots & K_{E_8}^{f1} & K_{E_1}^{T1} & \dots & 0 & K_{E_L}^L \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & K_{E_8}^{f8} & K_{E_1}^{T8} & \dots & K_{E_8}^{T8} & K_{E_L}^L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{E_1}^f \\ \Phi_{E_2}^f \\ \vdots \\ \Phi_{E_8}^f \\ \Phi_{E_1}^T \\ \Phi_{E_2}^T \\ \vdots \\ \Phi_{E_8}^T \\ \Phi_{eq. E_L}^L \end{pmatrix} \quad 2-29$$

Sin embargo, sin conocer la distribución angular de la incidencia de protones es imposible resolver este sistema. Si se está trabajando en un entorno donde esta distribución angular es desconocida, se necesitará algún método para medir esta distribución y obtener una relación entre las fluencias a diferentes ángulos.

### 2.3.2 Caso isotrópico

En el caso de LDT se puede suponer que la radiación es isotrópica, que aunque esto no es estrictamente cierto, pues los protones atrapados<sup>4</sup> tienen una dirección preferente relacionada con las líneas de campo magnético de la Tierra, el satélite en el que va embarcado el instrumento rota sobre sí mismo de tal forma que unido a la traslación en torno a Tierra la radiación acumulada sí puede considerarse omnidireccional y homogénea en su conjunto.

Para seguir simplificando el modelo, es necesario fijar de manera conveniente los blindajes. Se consideran tres escenarios: apantallamientos laterales y traseros infinitos, apantallamientos nulos, y un apantallamiento compensado de tal forma que deje a uno de los pisos igualmente apantallado por todas las direcciones.

El caso de un apantallamiento infinito sería un caso resuelto, pues se anulan los efectos laterales y traseros y solo quedaría el sistema triangular (compatible y determinado) del caso frontal. El problema es que este caso necesitaría de blindajes de casi medio metro de aluminio por todos los lados, es decir, mayor que las dimensiones

<sup>4</sup> Cabe recordar que los protones atrapados son la fuente principal de radiación presente en las órbitas bajas (LEO – Low Earth Orbit) como la que tiene LDT a bordo del satélite NANOSAT-1B.

del propio satélite NANOSAT, donde LDT iría embarcado, y esto sin hablar de la masa asociada.

El caso de un apilamiento sin blindajes laterales ni traseros presenta una simetría interesante en la que al suponer incidencia homogénea omnidireccional los elementos frontales y traseros son justamente los mismos.

$$\begin{aligned}
 E_{E_1}^F &= E_{E_8}^T & \Phi_{E_1}^F &= \Phi_{E_8}^T = \Phi_{E_1} \\
 E_{E_2}^F &= E_{E_7}^T & \Phi_{E_2}^F &= \Phi_{E_7}^T = \Phi_{E_2} \\
 E_{E_j}^F &= E_{E_{8-j+1}}^T & \Phi_{E_j}^F &= \Phi_{E_{8-j+1}}^T = \Phi_{E_j} \\
 \underbrace{E_{E_8}^F = E_{E_1}^T}_{\text{Sin blindaje trasero}} & & \underbrace{\Phi_{E_8}^F = \Phi_{E_1}^T = \Phi_{E_8}}_{\text{Incidencia homogénea omnidireccional}}
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

Bajo el supuesto de incidencia angular homogénea de radiación el efecto lateral también puede expresarse en los términos de las mismas fluencias:

$$\Delta I^j = \sum_{i=1}^{m=8} \overbrace{\left( \underbrace{K_{E_i}^{Fj}}_{\text{Frontal}} + \underbrace{K_{E_{8-i+1}}^{Tj}}_{\text{Trasero}} + \underbrace{K_{E_i}^{Lj}}_{\text{Lateral}} \right)}^{\text{Efecto}} \cdot \Phi_{E_i} \tag{2-31}$$

consiguiendo así un sistema que aparentemente tiene 8 ecuaciones y 8 incógnitas, aunque no está demostrado que sea compatible determinado. De hecho, se puede ver que en realidad es un sistema indeterminado, pues de las 8 ecuaciones, solo cuatro son independientes.

Para demostrarlo, primero se separan los términos del efecto lateral, que como son idénticos en todos los pisos no alteran la independencia de las expresiones del sistema. A la matriz del sistema se la llamará  $M_k^{(F+T+L)}$  y es igual a la suma término a término de las tres contribuciones:

$$M_k^{(F+T+L)} = M_k^F + M_k^T + M_k^L \tag{2-32}$$

Donde  $M_k^L$  es una matriz 8x8, con sus 8 filas iguales. Si se representa la parte frontal y la trasera se tiene:



$$M_k^{(F+T)} = \begin{pmatrix} K_{E_1}^{f1} & K_{E_2}^{f1} & K_{E_3}^{f1} & K_{E_4}^{f1} & K_{E_5}^{f1} & K_{E_6}^{f1} & K_{E_7}^{f1} & (K_{E_8}^{f1} + K_{E_1}^{T1}) \\ 0 & K_{E_2}^{f2} & K_{E_3}^{f2} & K_{E_4}^{f2} & K_{E_5}^{f2} & K_{E_6}^{f2} & (K_{E_7}^{f2} + K_{E_2}^{T2}) & (K_{E_8}^{f2} + K_{E_1}^{T2}) \\ 0 & 0 & K_{E_3}^{f3} & K_{E_4}^{f3} & K_{E_5}^{f3} & (K_{E_6}^{f3} + K_{E_3}^{T3}) & (K_{E_7}^{f3} + K_{E_2}^{T3}) & (K_{E_8}^{f3} + K_{E_1}^{T3}) \\ 0 & 0 & 0 & K_{E_4}^{f4} & (K_{E_5}^{f4} + K_{E_4}^{T4}) & (K_{E_6}^{f4} + K_{E_3}^{T4}) & (K_{E_7}^{f4} + K_{E_2}^{T4}) & (K_{E_8}^{f4} + K_{E_1}^{T4}) \\ 0 & 0 & 0 & K_{E_5}^{f5} & (K_{E_5}^{f5} + K_{E_4}^{T5}) & (K_{E_6}^{f5} + K_{E_3}^{T5}) & (K_{E_7}^{f5} + K_{E_2}^{T5}) & (K_{E_8}^{f5} + K_{E_1}^{T5}) \\ 0 & 0 & K_{E_6}^{f6} & K_{E_5}^{f6} & K_{E_4}^{f6} & (K_{E_6}^{f6} + K_{E_3}^{T6}) & (K_{E_7}^{f6} + K_{E_2}^{T6}) & (K_{E_8}^{f6} + K_{E_1}^{T6}) \\ 0 & K_{E_7}^{f7} & K_{E_6}^{f7} & K_{E_5}^{f7} & K_{E_4}^{f7} & K_{E_3}^{f7} & (K_{E_7}^{f7} + K_{E_2}^{T7}) & (K_{E_8}^{f7} + K_{E_1}^{T7}) \\ K_{E_8}^{f8} & K_{E_7}^{f8} & K_{E_6}^{f8} & K_{E_5}^{f8} & K_{E_4}^{f8} & K_{E_3}^{f8} & K_{E_2}^{f8} & (K_{E_8}^{f8} + K_{E_1}^{T8}) \end{pmatrix} \quad 2-33$$

En esta matriz se demuestra que la fila 1 es igual que la fila 8, la 2 igual que la 7 y así sucesivamente. Esta simetría proviene de que el factor de daño del piso 1 de la energía más baja frontal, es casi igual al factor de daño del piso 8 de la energía más baja trasera ( $K_{E_1}^{F1} \cong K_{E_8}^{T8}$ ). Sucede lo mismo con el resto de pisos y energías. Para verlo de forma más clara se representa en la Fig. 2-22 algunas de estas relaciones.

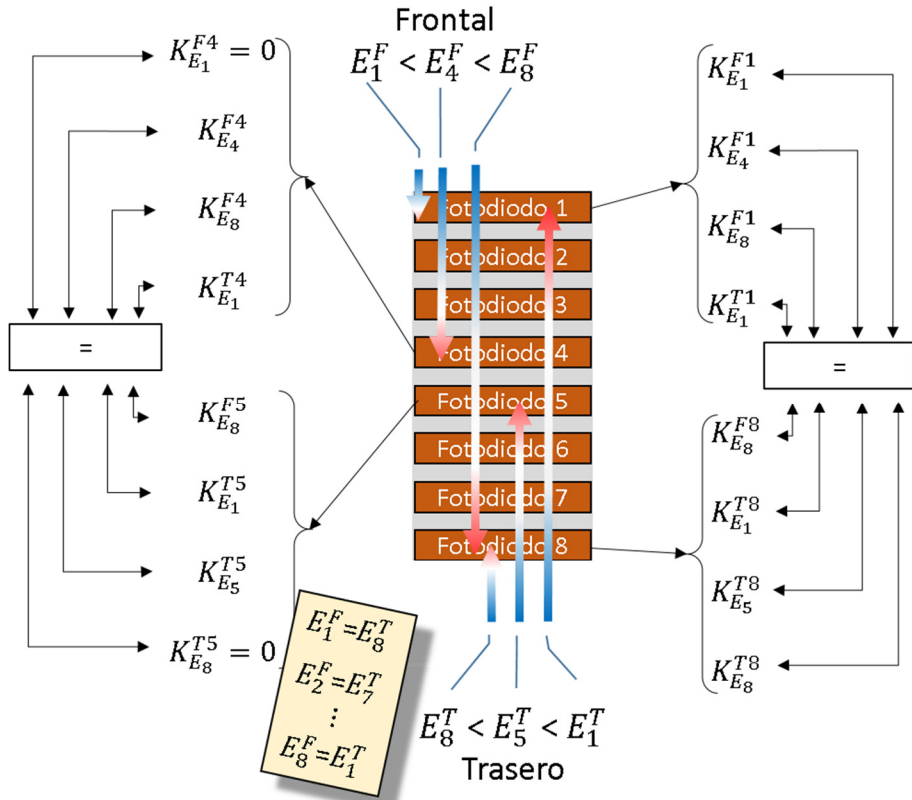


Fig. 2-22. Relación existente entre los factores de daño frontales y traseros

Para romper esta simetría, es necesario introducir un blindaje trasero que haga que la  $E_{E1}^F \neq E_{E8}^T$ . A fin de que todas las ecuaciones sean independientes, es necesario que este blindaje tenga un espesor tal que  $E_{E8}^F \leq E_{E8}^T$ . En el caso de que  $E_{E8}^F < E_{E8}^T$  el sistema completo se podría describir con 16 fluencias. Pero si se hace que  $E_{E8}^F = E_{E8}^T$  basta con 15. En la Fig. 2-23 se presenta un esquema de las torres, el blindaje trasero y la distribución de energías, las cuales ahora se enumeran de  $E_1$  a  $E_{15}$ .

En estas condiciones, la expresión 2-31 se puede escribir:

$$\Delta I^j = \sum_{i=1}^{m=15} \overbrace{\left( K_{E_i}^{Fj} + K_{E_i}^{Tj} + K_{E_i}^L \right)}^{\text{Efecto frontal + trasero + lateral}} \cdot \Phi_{E_i} \quad 2-34$$

donde:

$$\begin{aligned} K_{E_i}^{Fj} &= 0 \quad ; \quad \forall i < j \\ K_{E_i}^{Tj} &= 0 \quad ; \quad \forall i < 16 - j \\ K_{E_i}^L &\neq 0 \quad ; \quad \forall i \end{aligned} \quad 2-35$$

Prescindiendo de los términos laterales que son iguales para todos los pisos:

$$M_K^{(F+T)} = \begin{pmatrix} K_{E_1}^{F1} & K_{E_2}^{F1} & \dots & K_{E_7}^{F1} & K_{E_8}^{F1} & K_{E_9}^{F1} & \dots & K_{E_{14}}^{F1} & (K_{E_{15}}^{F1} + K_{E_{15}}^{T1}) \\ 0 & K_{E_2}^{F2} & \dots & K_{E_7}^{F2} & K_{E_8}^{F2} & K_{E_9}^{F2} & \dots & (K_{E_{14}}^{F2} + K_{E_{14}}^{T2}) & (K_{E_{15}}^{F2} + K_{E_{15}}^{T2}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_7}^{F3} & K_{E_8}^{F3} & K_{E_9}^{F3} & \dots & (K_{E_{14}}^{F3} + K_{E_{14}}^{T3}) & (K_{E_{15}}^{F3} + K_{E_{15}}^{T3}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_7}^{F4} & K_{E_8}^{F4} & K_{E_9}^{F4} & \dots & (K_{E_{14}}^{F4} + K_{E_{14}}^{T4}) & (K_{E_{15}}^{F4} + K_{E_{15}}^{T4}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_7}^{F5} & K_{E_8}^{F5} & K_{E_9}^{F5} & \dots & (K_{E_{14}}^{F5} + K_{E_{14}}^{T5}) & (K_{E_{15}}^{F5} + K_{E_{15}}^{T5}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_7}^{F6} & K_{E_8}^{F6} & K_{E_9}^{F6} & \dots & (K_{E_{14}}^{F6} + K_{E_{14}}^{T6}) & (K_{E_{15}}^{F6} + K_{E_{15}}^{T6}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_7}^{F7} & K_{E_8}^{F7} & (K_{E_9}^{F7} + K_{E_9}^{T7}) & \dots & (K_{E_{14}}^{F7} + K_{E_{14}}^{T7}) & (K_{E_{15}}^{F7} + K_{E_{15}}^{T7}) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & (K_{E_8}^{F8} + K_{E_8}^{T8}) & (K_{E_9}^{F8} + K_{E_9}^{T8}) & \dots & (K_{E_{14}}^{F8} + K_{E_{14}}^{T8}) & (K_{E_{15}}^{F8} + K_{E_{15}}^{T8}) \end{pmatrix} \quad 2-36$$

Por la estructura triangular de las 8 primeras columnas se demuestra que el sistema está formado por 8 ecuaciones independientes, es decir, ninguna es combinación lineal de las otras. Esto sería igual aún con los términos laterales, precisamente por ser iguales



Fig. 2-23. Representación de las energías frontales y traseras en un apilamiento con blindaje extra en la parte de atrás.

en todos los pisos. El sistema actual vuelve a ser un sistema indeterminado, pues se tienen 8 ecuaciones y 15 incógnitas, pero ahora se aprovecha la información de todos los pisos y si se consiguen relaciones adicionales, se tendrán datos de la fluencia de 15 energías, y no de 4 como en el caso sin apantallar.

Bajo esta situación, solo se necesitaría un segundo sistema de ecuaciones cuyas incógnitas fueran las mismas 15 fluencias ( $\Phi_{E_i}$ ) del sistema 2-34, pero con una matriz de daño diferente. Este segundo sistema de ecuaciones podría venir de otro tipo de efecto en la misma torre, o usar una torre de tecnología diferente en la que los efectos de la radiación sean distintos. Tenemos por tanto dos alternativas al alcance de la mano:

- que la matriz del sistema 1 esté basado en efectos de DD en silicio (proporcional al NIEL) y la matriz del sistema 2 en efectos de ionización en silicio (proporcional al LET),
- o que una esté basada en los efectos de DD en silicio (fotodiodos de PIN de silicio) y la otra en efectos de DD en GaAs (LED de GaAs).

Si todas las ecuaciones son independientes entre sí, el sistema será compatible determinado. En LDT dispondremos de ambas alternativas, y con ello tres sistemas de ecuaciones: el **sistema 1** basado en los efectos de ionización sobre el fotodiodo PIN de silicio, el **sistema 2** basado en los efectos de DD en un fotodiodo PIN de silicio, y **sistema 3** basado en los efectos de DD en un LED de unión simple de GaAs.

Con el objetivo de introducir una simetría extra en el sistema se diseñaron los blindajes para conseguir un piso que esté igualmente apantallado frontalmente, desde atrás y lateralmente. Para conseguirlo se ajustó el espesor lateral, el trasero y el de la separación entre pisos de tal forma que **un piso tenga una energía umbral aproximadamente igual en todas las direcciones**. Esto convierte a este piso en una referencia que podrá ser tratada como en el caso descrito en §2.1.2.2 (*Caso II: Análisis de un sensor apantallado homogéneamente*).

Inicialmente se pretendía que fuera el piso 8 el que estuviera apantallado de igual forma por todos los lados, pero el resultado final fue que el piso 7 resultó estar apantallado de forma más homogénea que el resto. Este piso tiene el mismo blindaje por delante y por detrás, y el blindaje lateral es, aproximadamente, igual a estos.

En la Fig. 2-24 y la Fig. 2-25 se adelantan los resultados obtenidos en la determinación experimental de las energías umbral de LDT. Estas energías fueron obtenidas durante la calibración. En la primera (Fig. 2-24) se muestra la energía umbral de cada piso LDT en configuración de incidencia delantera (puntos azules) y en incidencia trasera (puntos rojos); y en la segunda (Fig. 2-25) se representan las energías umbrales de cada una de las 12 direcciones evaluadas. Las direcciones #1 y #5 son las correspondientes a la incidencia frontal y trasera, ese es el motivo por el cual no aparecen en la Fig. 2-25. Estos resultados serán mostrados y discutidos en §6.2.

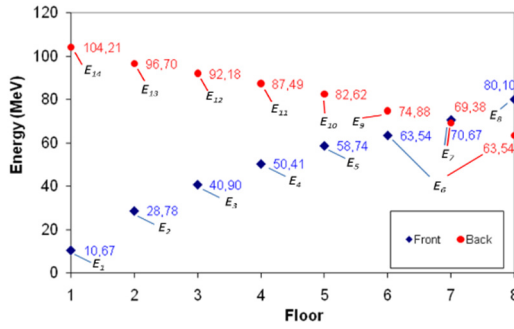


Fig. 2-24. Energía umbral frontal (Azul) y trasera (rojo) de LDT

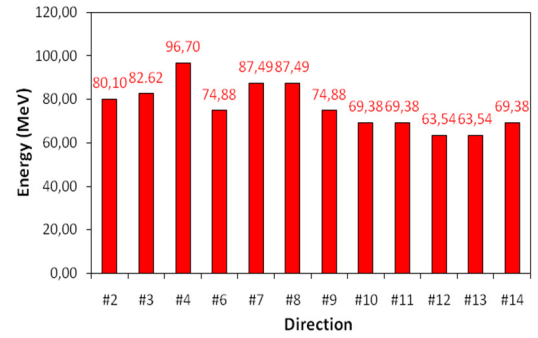


Fig. 2-25. Energía umbral de las 12 direcciones laterales seleccionadas para la caracterización del sistema. La dirección #1 y #5 no aparecen por tratarse de la frontal y trasera

En esta situación se ha llegado a un sistema con 7 ecuaciones independientes y una más que podría ser redundante o incompatible, y 14 incógnitas:

$$M_k^{(F+T)} = \begin{pmatrix} K_{E_1}^{F1} & K_{E_2}^{F1} & \dots & K_{E_6}^{F1} & K_{E_7}^{F1} & K_{E_8}^{F1} & K_{E_9}^{F1} & \dots & K_{E_{13}}^{F1} & (K_{E_{14}}^{F1} + K_{E_{14}}^{T1}) \\ 0 & K_{E_2}^{F2} & \dots & K_{E_6}^{F2} & K_{E_7}^{F2} & K_{E_8}^{F2} & K_{E_9}^{F2} & \dots & (K_{E_{13}}^{F2} + K_{E_{13}}^{T2}) & (K_{E_{14}}^{F2} + K_{E_{14}}^{T2}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_6}^{F3} & K_{E_7}^{F3} & K_{E_8}^{F3} & K_{E_9}^{F3} & \dots & (K_{E_{13}}^{F3} + K_{E_{13}}^{T3}) & (K_{E_{14}}^{F3} + K_{E_{14}}^{T3}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_6}^{F4} & K_{E_7}^{F4} & K_{E_8}^{F4} & K_{E_9}^{F4} & \dots & (K_{E_{13}}^{F4} + K_{E_{13}}^{T4}) & (K_{E_{14}}^{F4} + K_{E_{14}}^{T4}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_6}^{F5} & K_{E_7}^{F5} & K_{E_8}^{F5} & K_{E_9}^{F5} & \dots & (K_{E_{13}}^{F5} + K_{E_{13}}^{T5}) & (K_{E_{14}}^{F5} + K_{E_{14}}^{T5}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_6}^{F6} & K_{E_7}^{F6} & (K_{E_8}^{F6} + K_{E_8}^{T7}) & (K_{E_9}^{F6} + K_{E_9}^{T6}) & \dots & (K_{E_{13}}^{F6} + K_{E_{13}}^{T6}) & (K_{E_{14}}^{F6} + K_{E_{14}}^{T6}) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & (K_{E_7}^{F7} + K_{E_7}^{T7}) & (K_{E_8}^{F7} + K_{E_8}^{T7}) & (K_{E_9}^{F7} + K_{E_9}^{T7}) & \dots & (K_{E_{13}}^{F7} + K_{E_{13}}^{T7}) & (K_{E_{14}}^{F7} + K_{E_{14}}^{T7}) \\ 0 & 0 & \dots & K_{E_6}^{T6} & K_{E_7}^{T8} & (K_{E_8}^{F8} + K_{E_8}^{T8}) & (K_{E_9}^{F8} + K_{E_9}^{T8}) & \dots & (K_{E_{13}}^{F8} + K_{E_{13}}^{T8}) & (K_{E_{14}}^{F8} + K_{E_{14}}^{T8}) \end{pmatrix} \quad 2-37$$

Para conseguir resolverlo de forma unívoca son necesarias más ecuaciones, como las que se obtienen de construir otros sistemas basados en distintas tecnologías o efectos. En LDT se vio que se disponía de tres sistemas de ecuaciones en total. Sin embargo, para

resolverlo y que la propagación de errores no se dispare, es necesario determinar los factores de daño con una incertidumbre baja. Una imprecisión del 10 % se traduce en casi el 100% de incertidumbre en la determinación de las fluencias más bajas del sistema, y eso suponiendo que el dato experimental de la corriente medida en los fotodiodos sea medido sin error.

## **2.4 Conclusiones e implicaciones sobre LDT**

De cara al futuro diseño y calibración de un monitor de radiación que emplee un apilamiento de detectores, se han sacado las conclusiones que se exponen a continuación.

La base del funcionamiento de LDT es la combinación del efecto del blindaje progresivo que producen los propios dispositivos sensores al estar apilados unos sobre otros, con los efectos macroscópicos observables en las propiedades del dispositivo sensor. Este efecto ha sido demostrado experimentalmente usando la degradación que sufre la corriente de oscuridad de un apilamiento de fotodiodos S5106.

Un haz mono-energético incidente frontalmente sobre un apilamiento de, por ejemplo, fotodiodos, produce un efecto diferente en cada piso, en función del lugar que ocupa en dicho apilamiento, por efecto del apantallamiento acumulado. Los protones van atravesando piso a piso produciendo un daño que es función de la energía con la que los atraviesa; este daño es mayor cuanto más profundo llegan, y máximo en el último piso que alcanzan (el NIEL es mayor para energías menores). El resto de pisos, los suficientemente apantallados, no sufren daño. En base a la definición que se dio de energía umbral (que es la mínima energía necesaria para alcanzar un piso) se define ahora el haz umbral, como el haz de irradiación de energía más alta que afecta a un piso de forma máxima sin afectar al siguiente, o afectándole de forma despreciable. Este nuevo concepto tiene que ser introducido por el hecho de que los haces de irradiación de los aceleradores de partículas no son mono-energéticos. De forma general se seguirá hablando de “energía umbral” aun cuando en realidad se refiera al “haz de energía umbral”, pues en la práctica, para el caso particular que nos ocupa, los haces usados en la calibración serán lo que fijen la base de energías para la discretización del sistema. Además, en el caso ideal en el que el haz del acelerador fuera mono-energético, coincidirían.

El modelo matemático que describe el comportamiento frontal es un sistema de ecuaciones lineales. La matriz del sistema es la que se ha denominado matriz de daño,

cuyos elementos se obtienen durante la calibración. Si la calibración se realiza con las energías umbrales de los pisos del apilamiento, el sistema de ecuaciones obtenido es compatible determinado.

Sin embargo, en la situación real que incluye términos laterales y traseros el sistema es indeterminado (infinitas soluciones). Se precisan relaciones adicionales.

Toda esta formulación teórica del concepto de LDT, lo sitúa en un incipiente TRL 2. Los TRL 3, 4 y 5 se alcanzará durante las irradiaciones de selección y caracterización de los dispositivos sensores (capítulo 4).

Bajo el supuesto de incidencia frontal, se realizaron dos ensayos sobre varios prototipos de LDT para verificar el principio de funcionamiento frontal y el procedimiento de calibración. Estos ensayos han influido en el diseño del instrumento y en el procedimiento de calibración, y han proporcionado un nivel de madurez tecnológica al conjunto de LDT de TRL 6 bajo el supuesto de incidencia frontal. A continuación se indican las implicaciones que han tenido estos ensayos sobre el diseño y sobre la calibración de LDT.

#### **Implicaciones sobre el diseño de LDT:**

- Será un apilamiento con todos los fotodiodos montados con su área activa hacia delante (de frente), incluido el fotodiodo del primer piso.
- Esto implica que este primer piso debe de estar protegido de la incidencia de luz, al menos, en el caso de las medidas de corriente de oscuridad. Para ello debe estar en un compartimento totalmente aislado de la luz exterior, o debe ser tapado con una lámina delgada opaca.
- El número máximo de pisos que se pueda montar y la energía más grande que se quiera medir, determinará el apantallamiento necesario entre pisos.

#### **Implicaciones sobre procedimiento de calibración de LDT:**

- Antes de iniciar la calibración se tendrá que esperar al menos 1 hora con el instrumento en el búnker de irradiación para que se ponga a la misma temperatura que la sala.
- Se iniciará el ensayo buscando las energías umbrales. Se tendrá como guía una simulación del modelo.

- No todas las energías disponibles en el acelerador son igual de rápidas de configurar. Esto puede acarrear retrasos en la ejecución y poner en peligro la calibración si no se consiguen las energías umbrales que diagonalizan el sistema de ecuaciones.

En una órbita LEO, la distribución angular de la incidencia de los  $p^+$  tiene una dirección privilegiada, pero debido a la rotación de Nanosat (en donde van embarcadas LDT) se considera que es isotrópica. De este modo se obtiene un sistema de 7 ecuaciones y 15 incógnitas por cada uno de los tres modos de medida de LDT:

- Modo 1 basado en los **efectos de ionización** sobre el **fotodiodo** PIN de silicio.
- Modo 2 basado en los **efectos de DD** en el **fotodiodo** PIN de silicio.
- Modo 3 basado en los **efectos de DD** en un **LED** de unión simple de GaAs.

Combinando los 3 modos se obtienen 21 ecuaciones con 15 incógnitas, pero si la incertidumbre de los elementos de la matriz no es inferior al 5 % la propagación de errores dispara la incertidumbre del resultado por encima del 100 %.

### **3 Técnicas experimentales para los ensayos de radiación**

*Se describen las diferentes instalaciones nacionales y extranjeras usadas durante las irradiaciones de LDT y sus dispositivos sensores. También se describen algunos factores de su ejecución.*

*Se resalta que durante estos ensayos de radiación se irradiaron, usando las mismas técnicas y sistema experimental, más de 300 muestras de 19 tipos diferentes de fotodiodos, y 31 tipos de LED de más de 10 fabricantes distintos, lo cual constituye una amplia base de información para la selección de este tipo de componentes para uso espacial y en entornos de radiación severos.*



### 3.1 Introducción

Para la irradiación de dispositivos y calibración de sensores de radiación es necesario el uso de distintas fuentes de radiación o aceleradores de partículas, en función de los efectos a estudiar. Las instalaciones que albergan estos elementos son de varios tipos, y necesitan de unas condiciones, controles y permisos muy específicos.

Para el desarrollo y calibración de LDT, han sido varias las irradiaciones ejecutadas usando dos tipos de instalaciones:

- Instalaciones gamma de fuentes de cobalto ( $^{60}\text{Co}$ ) para evaluar la degradación por dosis de ionización total.
- Aceleradores de protones para el estudio de la degradación por efecto de los DD.

Las técnicas de irradiación aunque parecidas entre sí, tienen algunas diferencias en función de los parámetros que se quieren medir o del tipo de radiación que se utiliza [Buch02], [Wil94]. En LDT las irradiaciones han tenido siempre como objetivo medir los efectos de la radiación sobre un dispositivo o sistema optoelectónico. Para conseguir esto, hay dos técnicas básicas:

- **Irradiación pasiva.** Su característica principal es que el dispositivo no es irradiado y caracterizado al mismo tiempo, y generalmente ni siquiera en el mismo sitio. Para su ejecución es necesario entrar y salir repetidas veces del búnker de irradiación. Irradiando y midiendo sus características de forma consecutiva. La forma de proceder es simple: se caracteriza la propiedad que quiere ser estudiada del dispositivo, posteriormente se introduce en la sala de irradiación y se irradia hasta un determinado nivel, se vuelve a sacar y a medir esa característica, se vuelve a irradiar; así sucesivamente el número de pasos deseado hasta alcanzar el nivel de radiación establecido. En ocasiones no es necesario sacar el sistema irradiado, basta que el operario entre y ejecute el procedimiento de caracterización. De esta forma se obtienen el valor del parámetro seleccionado a diferentes niveles de radiación acumulada.
- **Irradiación activa.** En este tipo de irradiación, el parámetro bajo estudio puede ser monitorizado desde la sala de irradiación sin necesidad de entrar, tocar o sacar el dispositivo. Algunos parámetros serán monitorizados incluso durante la propia irradiación, y otros pueden ser medidos e irradiados de forma alterna.

Las medidas de parámetros ópticos de dispositivos optoelectrónicos se enfrentan con el problema de la reproducibilidad asociada al alineamiento óptico entre los emisores y los detectores de luz. Unos son los dispositivos bajo estudio, y los otros son patrones de referencia que se utilizan para caracterizar. Para reducir la falta de reproducibilidad debida a cambios en el alineamiento, se debe garantizar que durante las medidas ópticas la posición de los LED y los fotodiodos sea la misma, esto se puede conseguir por una de estas dos estrategias:

- No mover los dispositivos durante toda la irradiación. Es decir, irradiando y caracterizando los parámetros optoelectrónicos sin modificar el alineamiento.
- Asegurar que cada vez que posicionamos los dispositivos para su caracterización optoelectrónica el alineamiento sea el mismo.

En el primer caso, hay que tener especial cuidado con las dilataciones térmicas, se pueden usar materiales con bajo coeficiente de expansión térmico, o asegurar que la temperatura no cambia a lo largo de toda la irradiación, que en ocasiones dura hasta varios días; en el segundo suele ser adecuado el uso de esferas integradoras, las cuales son poco dependientes de la posición del emisor y/o del detector.

Una situación ideal sería combinar ambos métodos, pero los condicionantes de las salas de irradiación generalmente limitan mucho las opciones disponibles.

Esto hace casi imprescindible desarrollar un sistema de caracterización portátil, adaptado a las características de la instalación en donde se realicen las irradiaciones, ya sean de TID o de DD.

Para los ensayos de radiación de LDT se han desarrollado diferentes sistemas de sujeción, adquisición, control y análisis específicos adaptados a las diferentes necesidades e instalaciones usadas. A estos sistemas experimentales, cuando son para dar soporte en los ensayos de instrumentos espaciales, se les suelen llamar EGSE (*Electronic Ground Support Equipment*) si solo se refiere a la parte electrónica y de SW, MEGSE (*MEchanical Ground Support Equipment*) refiriéndose a los montajes mecánicos necesarios para la sujeción, alineamiento, etc. Finalmente se denomina OGSE (*Optical Ground Support Equipment*) cuando se precisan montajes ópticos.

Durante el desarrollo del instrumento LDT se han planificado y ejecutado 4 grupos diferentes de ensayos de radiación:

- Selección dispositivos sensores (SDS)
- Caracterización de los dispositivos seleccionados (CDS)
- Verificación del principio de funcionamiento (VPF)
- Calibración del instrumento

La Tabla 3-1 muestra un resumen de todas la irradiaciones que han tenido que ver con el desarrollo y caracterización de este instrumento, indicando el tipo, la fecha, la instalación en la que se realizó, el tipo de componentes irradiados, el grupo al que pertenece, y los objetivos que se perseguían en su ejecución.

Tabla 3-1. Campañas de irradiación para el desarrollo de LDT

Tabla 5-1. Campañas de irradiación para el desarrollo de LDT					
Tipo	Código Irradiación	Fecha	Instalación	Componentes/ Sistema irradiado	Grupo [Objetivos]
Activa	1ª Gamma	17-03-03	Nayade/	Fotodiodos	SDS [Selección De Componentes]
	2ª Gamma	10-04-03	CIEMAT		
	3ª Gamma	11-03-04	[España]		
Pasiva	1ª P <sup>+</sup>	14-09-04	LIF-UCL [Bélgica]	Fotodiodos; LED	
	2ª P <sup>+</sup>	03-03-05			
	3ª P <sup>+</sup>	07-12-05	RADEF [Finlandia]	Fotodiodos; LED	
	4ª P <sup>+</sup>	09-06-06			
	5ª P <sup>+</sup>	01-07-06			
	6ª P <sup>+</sup>	23-10-06			
Activa	1ª LDT	23-10-06	PIF-PSI [Suiza]	Apilamientos simples de fotodiodos	VPF [Verificación Principio de Funcionamiento]
	2ª LDT	14-2-07			VPF [Determinar mejor tipo de apilamiento y posibles complicaciones de calibración]
Activa	7ª P <sup>+</sup>	14-02-07	PIF-PSI [Suiza]	Familia S5107 [Fotodiodos]	CDS [Medida del NIEL y verificación método de irradiación]
Pasiva	8ª P <sup>+</sup>	27-06-08		Candidatos LDT [L9338 y S5107]	CDS [Influencia del flujo y fluencias bajas]
Activa	Calibración Frontal de LDT	04-10-08	PIF-PSI [Suiza]	QM de LDT	Calibración de LDT: [Determinación de energías umbrales y niveles adecuados para calibrar el FM]
				FM de LDT	Calibración de LDT: [CALIBRACIÓN FRONTAL del FM]
	Calibración Lateral de LDT	07-05-10		QM de LDT	Calibración de LDT: [Determinación de energías umbrales laterales]

En este apartado se van a dar algunos detalles sobre las instalaciones usadas, y se describen los sistemas experimentales desarrollados *ad hoc* para su ejecución. Los resultados y las condiciones exactas de irradiación de cada uno de los ensayos son tratados más adelante, en los capítulos correspondientes al desarrollo del instrumento.

## 3.2 Instalaciones

### 3.2.1 Instalaciones gamma

Los rayos gamma son una radiación ionizante que no produce DD y que no está presente en el espacio. Sin embargo es comúnmente usada para simular los efectos de ionización del entorno de radiación espacial.

Las irradiaciones con gamma han sido usadas para evaluar el efecto del TID sobre las ventanas transparentes de diferentes LED y fotodiodos comerciales, y entrenar las técnicas de radiación sobre componentes optoelectrónicos. Todos estos ensayos estuvieron enmarcados dentro del proceso de las primeras pruebas de selección de estos dispositivos comerciales.

#### 3.2.1.1 NAYADE (CIEMAT) – Madrid (España)

El NAYADE del CIEMAT [www.ciemat.es] es una instalación gamma tipo “piscina” que utiliza fuentes de cobalto ( $^{60}\text{Co}$ ). Las fuentes de  $^{60}\text{Co}$  se sitúan en el fondo de la piscina de 4 metros de profundidad (Fig. 3-1 izquierda), en la que el agua actúa como pantalla para evitar que la radiación alcance la superficie. Dicha instalación fue utilizada durante las primeras irradiaciones entre 2003 y 2005.

Las muestras, o el sistema a irradiar, se introducen en una capsula cilíndrica hermética de acero inoxidable de 70 cm de alto y 30 cm de diámetro (Fig. 3-1 derecha). El cilindro se sumerge en la piscina, la tasa de dosis se regula controlando la distancia de dicha capsula al fondo de la piscina. La capsula se sujeta a dos carriles laterales para que esta esté siempre justo en el centro (enfrentada directamente a las fuentes de cobalto) y se suspende por medio de una grúa motorizada con un cable de acero.

El cilindro dispone de una manguera estanca que llega hasta la superficie para permitir la entrada y salida de cables. Estos cables facilitan realizar una irradiación activa monitorizando los parámetros y señales del sistema del interior del cilindro.

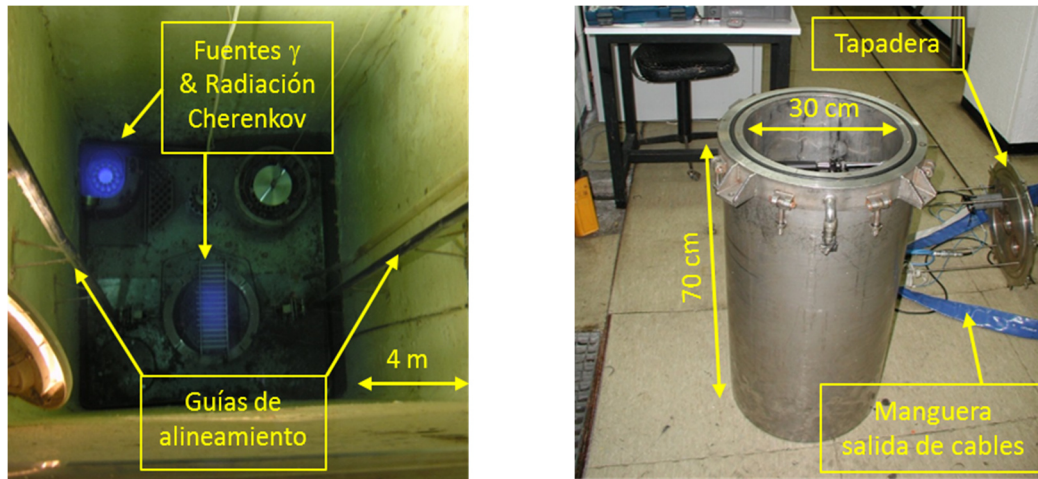


Fig. 3-1. Piscina del NAYADE (CIEMAT) en donde se aprecian las guías de alineamiento y el color azul de la radiación Cherenkov ([Che34] y [Tam37]) producida por la radiación gamma (izquierda); Cilindro estanco usado para introducir el sistema a irradiar dentro de la piscina (derecha)

### 3.2.1.2 *Radiation Physics Laboratory* (USC) – Santiago de Compostela (España)

A pesar de no describir en este trabajo las irradiaciones realizadas a los TMP-36 (los sensores de temperatura de LDT) realizadas en el *Radiation Physics Laboratory* (RPL) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), sí se quería dejar constancia de su existencia y de las facilidades que otorga una instalación de sus características.

Su fuente de cobalto está apantallada con una estructura de plomo en un búnker de 56 m<sup>2</sup>. Desde el exterior del búnker, se puede accionar un sistema que extrae la fuente del apantallamiento para que dé comienzo la irradiación. Las ventajas de una instalación “al aire” (en contraposición a la piscina) están relacionadas con la facilidad y versatilidad de implementación de los sistemas experimentales: no hay cilindros ni mangueras estancas que condicionen el montaje experimental. Esta instalación es también más adecuada para irradiar a ritmos bajos, permitiendo en estos casos una superficie de irradiación de mayor área.

Esta instalación ha sido usada también en las irradiaciones de calibración de los RadFET de NANOSAT, y de algunas de las tecnologías experimentales del nuevo modelo de LDT para SEOSAT/INGENIO, que quedan fuera del alcance de esta tesis.




<p><b>Gamma facility - 1</b></p> <p><i>Source type</i> Cobalt-60</p> <p><i>Emitted radiation / energy</i> Photons / 1.17 and 1.33 MeV</p> <p><i>Dose rates</i> 6.2 krad / h to 28 rad/h (dose to air rates).</p> <p><i>Volume of irradiation chamber</i> height = 3 m, surface = 7 x 8 m<sup>2</sup></p> <p><i>Source Geometry</i> Square irradiation areas between 12 x 12 and 240 x 240 cm<sup>2</sup></p> <p><i>Dosimetry Method</i> Ionization chamber dosimetry</p> <p><i>Temperature control available</i> NONE, 16-18 °C, 1°C.</p> <p><i>Special access conditions</i> Non - stop irradiation service (24 / 7 access)</p>	 <p>Radiation Physics Laboratory UNIVERSITY OF SANTIAGO DE COMPOSTELA</p> <p>Ctra DP-7801 km 1, Santiago de Compostela E-15782 SPAIN Contact Faustino Gómez e-mail faustino.gomez@usc.es Phone +34 881814102 Contact Diego Miguel González e-mail diego.gonzalez@usc.es</p>  
--	---

Fig. 3-2. Datos de contacto y características principales de la instalación de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) de España. Figura obtenida de [RADECS04]

### 3.2.2 Aceleradores de partículas.

Los ensayos de protones se realizaron para evaluar los DD sobre fotodiodos y LED. Este tipo de ensayo se realizó en todas las fases del desarrollo de LDT: selección de sensores, caracterización, validación del principio de funcionamiento y calibración del modelo de vuelo. Cada tipo de ensayo requirió de unos desarrollos específicos, combinado técnicas de irradiación activa con técnicas pasivas.

La ejecución de los ensayos con protones fue, en todos los casos, en aceleradores de partículas tipo sincrotrón con un cañón de protones al “aire”. Esto es, la salida de los protones es a un espacio abierto, y no en una cámara presurizada. El haz va paralelo al suelo y a una altura aproximada de 1,5 m. Se utilizaron 3 instalaciones diferentes, situadas en Bélgica (LIF-UCL), Finlandia (RADEF) y Suiza (PIF-PSI). Todas ellas funcionan con un haz primario de una determinada energía, este haz principal es desviado hacia el cañón de irradiación en donde se encuentran un conjunto de degradadores (planchas de cobre o aluminio de diferentes espesores) que pueden ser combinados entre sí para atenuar la energía principal. Esto proporciona un conjunto discreto de energías “fácilmente” seleccionables (entre ~8 MeV y la energía máxima del haz principal). Justo a la salida del haz y después de los degradadores, se colocan los dispositivos a irradiar. Al estar en una habitación abierta, estas muestras pueden ser colocadas directamente en una mesa regulable en altura (como en el LIF-UCL), en una mesa fija con unos elevadores regulables (como en el RADEF) o sobre un soporte montado sobre un posicionador XYZ, que permite centrar las muestras con mayor precisión y reproducibilidad (como en el PIF-PSI). La Fig. 3-4 está formada por tres fotografías, en cada una de ellas se observa una tarjeta de irradiación colocada a la salida del haz de cada una de las instalaciones usadas.



Fig. 3-3. De izquierda a derecha se muestran la salida del cañón de protones con la tarjeta de fotodiodos y LED a irradiar situada en el punto de irradiación de las instalaciones del: LIF-USCL (Bélgica), RADEF (Finlandia) y PIF-PSI (Suiza)

En los tres casos, el haz de protones tuvo unas características de homogeneidad espacial parecidas que establecían el área de trabajo en un círculo de  $\sim 9$  cm de diámetro. En la Fig. 3-4 se muestra los registros obtenidos en papel por el sistema de caracterización de la homogeneidad de la instalación de Bélgica, el cual, como se ve, fue del orden del  $\pm 8$  %. Estos datos fueron tenidos en cuenta en los análisis, pues los fotodiodos del centro recibían hasta un 16 % más radiación que los posicionados en la circunferencia. Estas caracterizaciones las realiza el personal de la instalación y estos datos se facilitan solo bajo demanda. Por defecto asumen una incertidumbre del 8% que puede ser corregida con un control preciso del posicionado conociendo este perfil del haz.

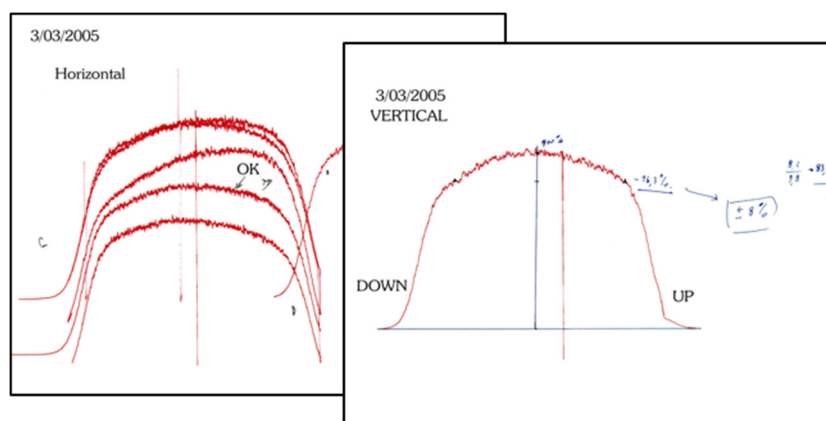


Fig. 3-4. Registro obtenido durante el proceso de caracterización del haz de protones en LIF-USCL (Bélgica) durante una de las irradiaciones



### 3.2.2.1 LIF (UCL) – Louvain La Neuve (Bélgica)








<b>PROTON facility - 1</b>		 <b>Centre de Ressources du Cyclotron</b> <b>UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN</b>  <a href="http://www.cyc.ucl.ac.be/">http://www.cyc.ucl.ac.be/</a> Chemin du cyclotron, 2 Louvain la Neuve B-1348 BELGIUM Contact Guy Berger e-mail <a href="mailto:guy.berger@uclouvain.be">guy.berger@uclouvain.be</a> Phones +32 10473225 +32 10452183
<i>Source name</i>	LIF	
<i>Source type</i>	Isochronous cyclotron	
<i>Energy Range</i>	62 MeV primary beam on DUT. down to 14 MeV using plastic degraders	
<i>Min - Max fluxes</i>	Few p / s cm <sup>2</sup> up to 10 <sup>9</sup> p / s cm <sup>2</sup>	
<i>Spot size / Uniformity - Beam shape</i>	80 mm diameter / 10%	
<i>Device positioning system</i>	Manual or X-Y motor controlled frame	
<i>Dosimetry Method</i>	Faraday cup + transmission chamber	    

Fig. 3-5. Datos de contacto y características principales de la instalación de la *Université Catholique de Louvains* (UCL) situada en Bélgica. Figura obtenida de [RADECS04]

### 3.2.2.2 RADEF (University of Jyväskylä) – Jyväskylä (Finlandia)






<b>PROTON facility - 1</b>		 <b>University of Jyväskylä</b> <b>DEPARTMENT OF PHYSICS</b>  <a href="https://www.jyu.fi/fysiikka/en">https://www.jyu.fi/fysiikka/en</a> Survoontie 9, Jyväskylä FI-40014 FINLAND Contact Ari Virtanen e-mail <a href="mailto:ari.virtanen@jyu.fi">ari.virtanen@jyu.fi</a> Phone +35 850 541 9401
<i>Source name</i>	JYFL K-130 cyclotron	
<i>Source type</i>	Cyclotron	
<i>Energy Range</i>	0 to 60 MeV, adjustable with the cyclotron and/or degraders	
<i>Methods to change energy</i>	Cyclotron tuning	
<i>Min - Max fluxes</i>	100 to 10 <sup>12</sup> protons / s cm <sup>2</sup>	
<i>User Flux control</i>	Yes	
<i>Spot size / Uniformity - Beam shape</i>	Ø = 10 cm / ± 10 %	 
<i>Device positioning system</i>	X, Y, Z + tilting	
<i>Special access conditions</i>	No	

Fig. 3-6. Datos de contacto y características principales de la instalación de la *University of Jyväskylä* en Finlandia. Figura obtenida de [RADECS04]

### 3.2.2.3 PIF (PSI) – Villigen (Suiza)

26


**PAUL SCHERRER INSTITUT (PSI)**

<http://pif.web.psi.ch/>  
 OBBA/010, Villigen PSI  
 5232 SWITZERLAND

**Irradiation Facilities/ Services: Protons.**

Fig. 3-7. Datos de contacto del *Paul Scherrer Institut*, Villigen, Suiza. Figura obtenida de [RADECS04]



### 3.3 Sistemas desarrollados para las irradiaciones de LDT

Esta sección se divide en cuatro apartados: en el primero (§3.3.1) se describe el sistema experimental desarrollado para las primeras irradiaciones de fotodiodos con rayos gamma; en el segundo (§3.3.2) las irradiaciones pasivas para la selección de fotodiodos y LED, así como para la caracterización de los elementos sensibles de LDT; en el tercero (§3.3.3) se describe la irradiación para la demostración del principio de funcionamiento (en la que se usó un prototipo de LDT) y la caracterización de la respuesta energética de los fotodiodos (medida del NIEL); y finalmente, en el último (§3.3.4) se describe el sistema experimental desarrollado para la calibración de LDT usando el modelo de calificación (QM) y el modelo de vuelo (FM).

#### 3.3.1 Irradiaciones Gamma

La irradiación con fotones gamma se realizó sobre fotodiodos de diferentes fabricantes. Se evaluó el cambio sufrido en la corriente de oscuridad y en la fotosensibilidad en función de la dosis total recibida. También se evaluó la respuesta de estos sensores a la tasa de dosis por ionización directa.

Su ejecución se realizó en la piscina gamma de la NAYADE, en donde introducir y sacar las muestras a irradiar es un proceso relativamente largo y laborioso. Es por eso que se optó por realizar una **irradiación activa** desarrollando un sistema de medida y evaluación de parámetros en tiempo real adaptado a esta instalación.

De esta forma se pudo también evaluar la corriente de ionización generada en el fotodiodo al ser irradiado y se obtuvo su respuesta a la tasa de dosis.

##### A. Sistema experimental

El sistema experimental estuvo condicionado por dos características de la instalación:

1. La instalación de *tipo piscina* introducía el riesgo de mojar el sistema, especialmente, si se ejecutaba una irradiación pasiva introduciendo y sacando continuamente el sistema del agua. Por esto se decidió ejecutar una irradiación activa que permitiera la medida de parámetros ópticos *in-situ*. Esto impuso el uso de emisores de luz, detectores de referencia, y apantallamientos para proteger ciertas zonas del montaje experimental.
2. La geometría del cilindro hermético de acero determinó la estructura optomecánica.

**Uso de un emisor de luz:** para poder evaluar la sensibilidad de los fotodiodos fue necesario introducir un emisor (VCSEL) que pudiera ser controlado desde el exterior, a fin de disponer de una fuente con la que poder regular la intensidad de luz. El sistema se diseñó para que el VCSEL pasara por 4 niveles de iluminación diferentes, desde el nivel 0 en el que está apagado, hasta el nivel 3 que luce con su máxima intensidad. Cada conjunto de 4 estados (de 0 a 3) corresponde a un ciclo de medida. Durante las irradiaciones se hizo pasar al emisor por los distintos niveles una y otra vez de forma cíclica, por lo que al final se obtuvo un número grande de ciclos. Junto con cada medida se almacenó, además del nivel y el ciclo, el instante temporal de la adquisición. La Fig. 3-8 muestra el VCSEL en un soporte cilíndrico y una representación de la evolución del ciclo de iluminación.

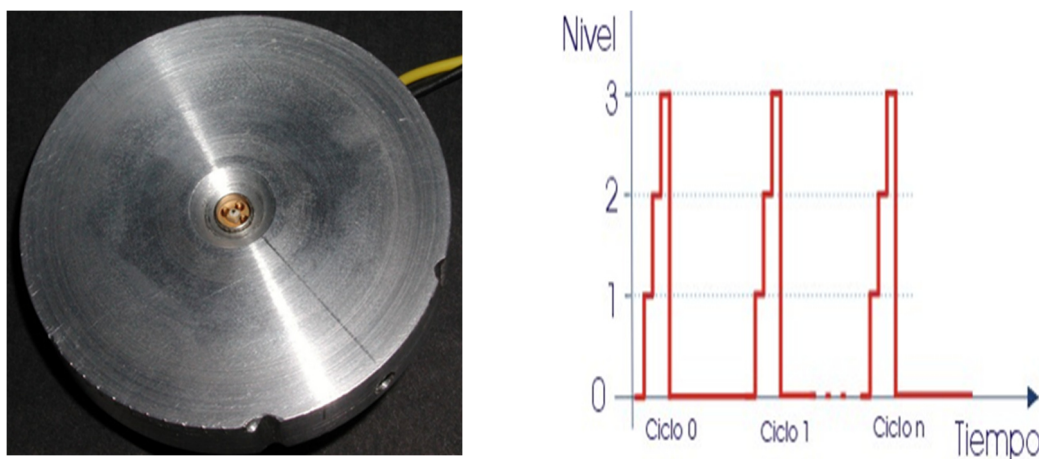


Fig. 3-8. Emisor de luz VCSEL empleado para la evaluación de la responsividad de los fotodiodos durante la irradiación. Se muestra alojado en la pieza de aluminio que hace a la vez de acople con el banco optomecánico y de apantallamiento extra para la radiación (izquierda); representación temporal del nivel de iluminación del ensayo alternando entre los niveles 0, 1, 2 y 3 sucesivamente (derecha)

**Fotodiodos de monitorización de referencia.** Para no confundir posibles variaciones de iluminación con variaciones en la señal debidas a la radiación se monitorizó la potencia óptica emitida por el VCSEL. Se usaron dos fotodiodos, uno colocado en frente del emisor y el otro en la zona de los detectores a irradiar (Fig. 3-9).

**Apantallamientos para la radiación:** se desarrollaron diversas estructuras de plomo adaptadas al cilindro y al banco optomecánico, tanto para proteger el VCSEL arriba mencionado, como para la electrónica de proximidad (Fig. 3-9), la cual debe de preparar la señal para ser enviada por un cable de 6m de longitud hasta la superficie de la piscina. En la superficie se encuentra el sistema de adquisición y el PC. Fueron también colocados apantallamientos específicos en los fotodiodos de referencia que monitorizaban la señal del VCSEL en todo momento. Sin estas protecciones, la

degradación de uno de estos componentes podría confundirse o enmascarar la degradación de los fotodiodos bajo estudio.

Con todo lo dicho y teniendo en cuenta que la radiación es emitida por las fuentes de  $^{60}\text{Co}$  desde el fondo de la piscina, es decir, llega desde abajo, el banco opto-mecánico se diseñó y desarrolló para:

- Posicionar los fotodiodos a irradiar en la parte inferior del cilindro.
- Iluminarlos desde arriba por un emisor convenientemente protegido de la radiación.
- Alojar y proteger a la electrónica de acondicionamiento de proximidad.
- Monitorizar la potencia de luz que llega a los detectores usando fotodiodos de referencia protegidos de la radiación.

Para facilitar la protección del VCSEL se optó por protegerlo con un bloque de plomo y embutido, a la vez, en un anillo de aluminio. Fue colocado en la parte superior, sin línea de visión directa con la fuente de  $^{60}\text{Co}$ , para lo cual se usó un espejo que dirigía la luz hacia los fotodiodos. Se usó un espejo de primera superficie para evitar los efectos que la radiación provoca por la formación de centros de color en otro tipo de espejos.

Los blindajes fueron contruidos artesanalmente uniando varias planchas de plomo de 1 y 5 mm de grosor. La estructura se montó con piezas de montajes optomecánicos. Para el diseño de los blindajes, la primera aproximación fue considerar que el comportamiento de la emisión gamma era como un frente de onda esférico emitido por un punto desde el fondo de la piscina, y que el cilindro estaría colocado a suficiente distancia para suponer un frente de ondas plano. De este modo, las zonas expuestas a radiación eran las coloreadas en azul en la Fig. 3-9, y las zonas protegidas por el plomo, las resaltadas en blanco. En la parte derecha de la misma figura, se muestra una visión desde arriba de la estructura dentro de la capsula cilíndrica que se introducía en la piscina. En la Fig. 3-10 se presenta una fotografía de la estructura que finalmente resultó, y que tuvo una masa total de 70 kg.

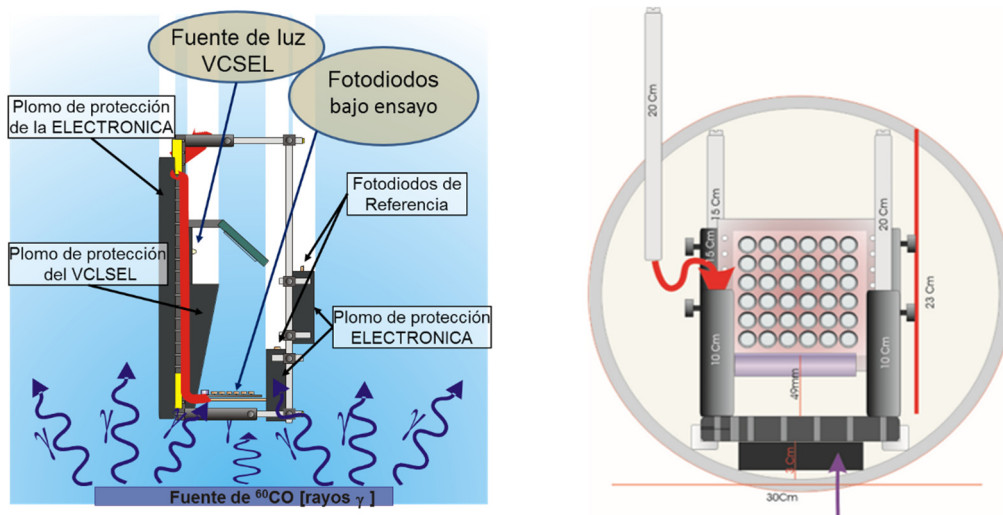


Fig. 3-9. Esquema de la visión lateral del sistema opto-mecánico señalando la posición de la fuente gamma, los blindajes, el emisor VCSEL de luz, el espejo, los fotodiodos irradiados y los de referencia. Las zonas blancas señalan los volúmenes que idealmente están libres de radiación (izquierda). Esquema del sistema dentro del cilindro de 30 cm visto desde arriba (derecha)

El siguiente paso de la descripción del EGSE se refiere al sistema de adquisición y control, el cual estaba constituido por una aplicación desarrollada en LabView, un PC, y diferentes instrumentos tales como fuentes de alimentación (HP E3632A), sistemas de adquisición de señales analógicas (HP34970 y HP349008A) y una tarjeta PCMCIA de National Instruments con varias líneas digitales de control.

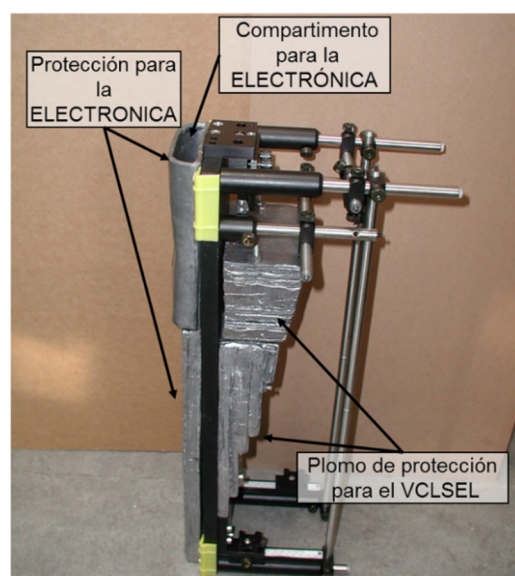


Fig. 3-10. Fotografía de la estructura desarrollada para las irradiaciones con gamma el CIEMAT

El PC, a través de un bus GPIB, controla el sistema de adquisición y la fuente de alimentación para el control del emisor de luz, así como las líneas digitales de activación de la electrónica de control. Estas tareas de adquisición y control, y las de almacenamiento, análisis y visualización son gobernadas por el EGSE desarrollado en LabView. La aplicación desarrollada tiene 6 módulos:

- **Configuración.** Inicializa todos los instrumentos y configura el número de detectores y niveles que se van a adquirir.

- **Ajustes previos.** En él se pueden visualizar unos niveles de referencia que deben ajustarse manualmente, a 0 V y a 5 V, actuando sobre unos reguladores específicos. También permite visualizar la señal de todos los fotodiodos para alinear el emisor de luz.
- **Adquisición.** Ejecuta los ciclos de adquisición cambiando el nivel de iluminación del VCSEL periódicamente. Se adquieren los datos y se ordenan en una matriz junto con el instante de la adquisición (“*Time Stamp*”). Los datos son almacenados después de cada ciclo de adquisición.
- **Pre-procesado.** Se realizan tres tareas: normalización de datos dividiendo por el valor de la señal de uno de los fotodiodos de referencia (generalmente el inferior, al cual le llega la luz después de la reflexión en el espejo); cálculo de la dosis total de cada ciclo; cálculo de la media de todos los datos adquiridos de un mismo nivel y ciclo para disminuir el ruido.
- **Guardar.** Se almacenan los datos tratados en un archivo nuevo.
- **Salir.** Cierra todas las comunicaciones con los sistemas externos y pone todas las salidas de control digital a nivel bajo.

## **B. Desarrollo de las irradiaciones**

Una vez que ya está todo montado, calibrado y funcionando, solo queda introducirlo en la piscina de irradiación a la profundidad adecuada para conseguir la tasa de dosis deseada. Permanecerá ahí durante el tiempo necesario para alcanzar la dosis total programada. En la Fig. 3-11 se muestra una fotografía, durante una de las irradiaciones, de las últimas comprobaciones del sistema antes de ser introducido en el cilindro; al lado, Fig. 3-12, se muestra el instante en el que el cilindro fue introducido en la piscina de irradiación, durante una de las irradiaciones ejecutadas en esta instalación.

Para evaluar la dependencia de la corriente de oscuridad con la tasa de dosis, el descenso se realiza a escalones: se sumerge hasta una profundidad dada que corresponde a una tasa de dosis determinada, se adquieren unos cuantos ciclos, se baja hasta el siguiente escalón previamente prefijado, se adquieren diversos ciclos otra vez, y así hasta llegar a la profundidad en la que se desarrollará todo el test.



Fig. 3-11. Últimas comprobaciones de la electrónica de proximidad antes de cerrar



Fig. 3-12. Instante en el que el cilindro es introducido en la piscina

Una vez transcurrido el tiempo de irradiación, el sistema es extraído de la piscina. Durante 2 días el cilindro permanece cerrado mientras se siguen adquiriendo las señales para monitorizar la recuperación natural (*annealing*) que se produce en algunos dispositivos.

Durante toda la irradiación se controlan los niveles de consumo de los circuitos y las señales de los fotodiodos irradiados. Cambios en estos parámetros podrían indicar un problema y sería necesario interrumpir el ensayo. En la Fig. 3-13 se muestra el sistema de adquisición y control del ensayo. En él se pueden ver las fuentes de alimentación de las diferentes electrónicas que intervienen en el ensayo, así como la que alimenta al emisor de luz, los sistemas de adquisición de HP y sistema DAQ de *National Instruments* unido al ordenador en el que está instalado el SW de control. La Fig. 3-14 muestra una de las tarjetas de irradiación con 16 fotodiodos.

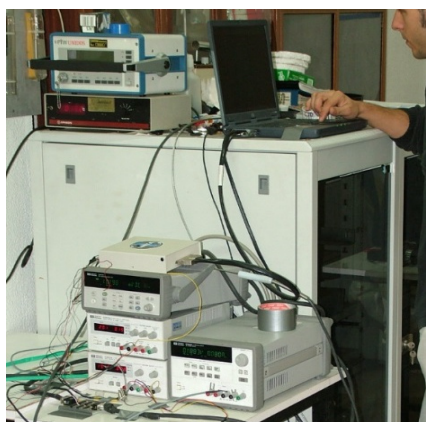


Fig. 3-13. Sistema de adquisición y control colocado en la superficie justo al lado de la piscina de irradiación

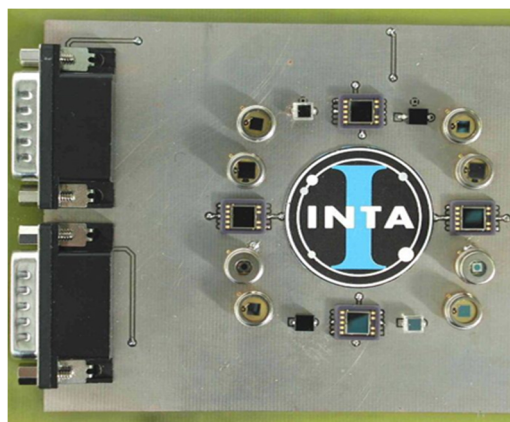


Fig. 3-14. Una de las tarjetas de fotodiodos para su irradiación con rayos gamma



### 3.3.2 Irradiaciones pasivas con protones

Las irradiaciones para la evaluación de los DD con protones se realizaron tanto sobre fotodiodos como sobre LED. En este caso, se evaluaron diferentes características de estos dispositivos en función de la fluencia total. No se realizó una irradiación activa por las complicaciones que esto introducía y porque no se consideró necesario dentro del marco del proyecto OWLS [Gue06], [Gue07], [Rod08], [Arr09], que fue el origen de estos ensayos.

A pesar de que las necesidades para la selección de componentes para OWLS no requería un estudio exhaustivo de algunos parámetros de estos dispositivos, se decidió, dentro de lo posible, y sin incrementar el gasto, ampliar el tipo y la calidad de las medidas para poder realizar un estudio más profundo de los efectos que estos dispositivos sufren por DD, y así abrir la posibilidad de nuevas aplicaciones espaciales para estos dispositivos optoelectrónicos. Gracias a esto surgió posteriormente la idea de LDT, y los datos y caracterizaciones extras que se habían obtenido facilitaron el inicio de esta línea de desarrollo.

**Los parámetros evaluados en los fotodiodos** están basados en su curva característica I-V, tanto del primer cuadrante (polarización directa), como del tercero (polarización inversa):

- **Primer cuadrante:** observación de cambios en el **factor de idealidad** [Sin94] de la unión PIN.
- **Tercer cuadrante:** estudio a diferentes niveles de iluminación y diferentes polarizaciones. Que se tradujeron en la determinación de la sensibilidad a la radiación de la **fotosensibilidad** y de la **corriente de oscuridad** a diferentes niveles de polarización.

En el caso de los **LED** se caracterizaron la **potencia óptica de emisión** y el **primer cuadrante** de la curva IV. El cambio de la corriente inversa de oscuridad, además de no tener ningún interés práctico directo, es realmente pequeño y difícil de medir.

#### 3.3.2.1 Selección de COTS

##### C. Sistema experimental

La irradiación con protones sobre fotodiodos y LED fue una irradiación pasiva ejecutada “a pasos”, en la que se irradiaron los dos tipos de componentes a la vez. Este

modo de actuación y las características de las instalaciones de protones utilizadas introdujeron ciertos condicionantes:

**Desarrollo del banco de medidas específico.** Debe estar situado en la sala de control para permitir realizar todas las medidas antes comentadas sobre los LED y los fotodiodos de forma rápida y precisa. Debe tener tanto emisores que iluminen a los fotodiodos irradiados, como detectores de referencia que midan la luz emitida por los LED irradiados. Además, debe ser totalmente opaco y estanco a la luz para poder realizar las medidas de corriente de oscuridad. Como es un sistema que necesita ser montado y desmontado muchas veces, y las medidas debe poder ser comparadas entre sí, el alineado debe ser preciso y reproducible, a la vez que rápido.

**Tarjeta porta-dispositivos.** La tarjeta electrónica donde se montan los dispositivos a irradiar debe estar diseñada para que todos ellos estén dentro de una circunferencia de diámetro 9 cm. Además, debe poder adaptarse a estar de pie encima de una mesa o a ser fijada en un portamuestras específico como el del PIF (Suiza). Esta tarjeta debe poder acoplarse con precisión al banco de medidas optoelectrónico.

**Alimentación de los dispositivos durante la irradiación.** Se desarrolló un sistema de alimentación que permitía controlar la alimentación de cada dispositivo individualmente durante la irradiación, para poder irradiarlos en diferentes condiciones de alimentación.

**Versatilidad en las medidas.** El sistema debe ser capaz de medir desde corrientes de cientos de pico-amperios, para la caracterización de la corriente de oscuridad, hasta algún micro-amperio para las responsividades. Además debe poder actuar sobre el voltaje de los fotodiodos para recorrer toda su curva IV, y sobre la corriente suministrada a los LED.

El sistema desarrollado tiene 5 partes que fueron diseñadas para cumplir con todo lo arriba descrito:

- Tarjeta portamuestras.
- Tarjeta optomecánica de medida e iluminación.
- Tarjeta electrónica de acondicionamiento y adquisición.
- Fuentes de alimentación.



- Aplicación desarrollada en LabView que controla, visualiza y almacena las medidas realizadas.

La **tarjeta portamuestras** es rectangular (Fig. 3-15), con los dispositivos ordenados en un círculo en el centro de una de las caras y con dos conectores en cada uno de los extremos en la otra cara. Un conector da servicio a todos los LED, que están situados en una de las mitades del círculo; el otro conector da servicio a los fotodiodos que están en la otra mitad. El número máximo de cada tipo de dispositivo viene impuesto por el número de canales del sistema de adquisición (16 canales en total) y por el área del haz de protones. En el caso de los LED se pudieron poner 16, pues son dispositivos pequeños. Sin embargo, solo entraron 9 fotodiodos en el espacio restante. Estas tarjetas fueron forradas de un material opaco para evitar contaminación lumínica en las medidas de corriente de oscuridad. Se añadieron a estas tarjetas unos perfiles de aluminio para la fijación tanto al sistema opto-mecánico de medida, como al soporte de la salida del acelerador. Además, estos perfiles de aluminio permitían fijarlo a una estructura en forma de soporte vertical para que pudieran estar encima de una mesa, lo cual fue fundamental en las instalaciones de Bélgica y Finlandia. La propia estructura de las tarjetas de medida tiene acoplados 4 tornillos de unos 8 cm de largo dispuestos para poder ser fijados de forma precisa en la estructura de medida. Se ha conseguido que sea versátil y compatible con la mayoría de las instalaciones de irradiación.

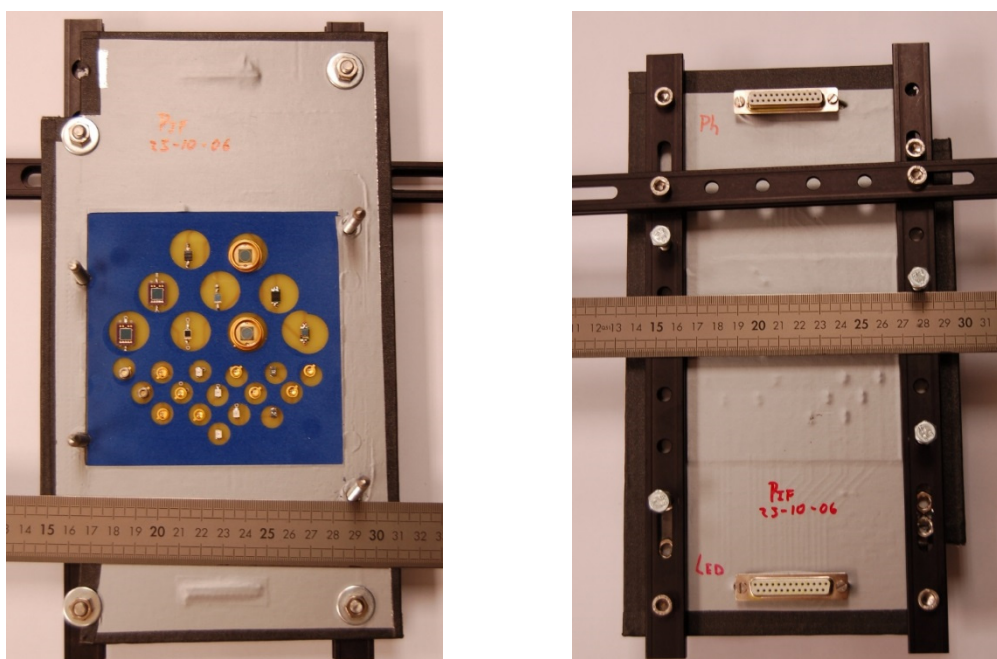


Fig. 3-15. Vista delantera y trasera de una de las tarjetas de irradiación

El **sistema optomecánico de medida** es una réplica especular de las tarjetas de irradiación descritas anteriormente. En cada posición de un fotodiodo se monta un LED, y en cada posición de un LED un fotodiodo. De esta forma, en frente de cada fotodiodo hay un LED, y enfrente de cada LED hay un fotodiodo. Es decir, esta tarjeta tiene 16 fotodiodos (de reducido tamaño) y 9 LED.

Para asegurar que la separación entre una tarjeta y otra es la misma se añadió al sistema optomecánico un espaciador, una plancha de delrin<sup>5</sup> negro de ~3 cm de espesor con un taladro en cada posición en donde se enfrentan los LED y los fotodiodos. Al enfrentar una tarjeta a la otra, cada fotodiodo irradiado queda enfrente de su LED dentro de una cavidad cilíndrica que lo aísla del entorno. A cada LED irradiado le pasa lo mismo con su fotodiodo de medida. Para sujetar una parte a la otra, se dispusieron cuatro tornillos pasantes fijos a la estructura de la tarjeta de irradiación (como ya se mencionó antes) que se sujetan con una tuerca desde el lado contrario del sistema de medida. En la superficie de unión entre la tarjeta de irradiación y el bloque espaciador del sistema de medida se puso un fieltro de color azul para que el ajuste no dejara ninguna rendija y fuese estanco a la luz. La parte trasera de esta tarjeta de medida también se forró de material opaco para así evitar la filtración de luz. En la Fig. 3-16 se muestran todas las partes del sistema de medida y las tarjetas de irradiación y de medida descritas.

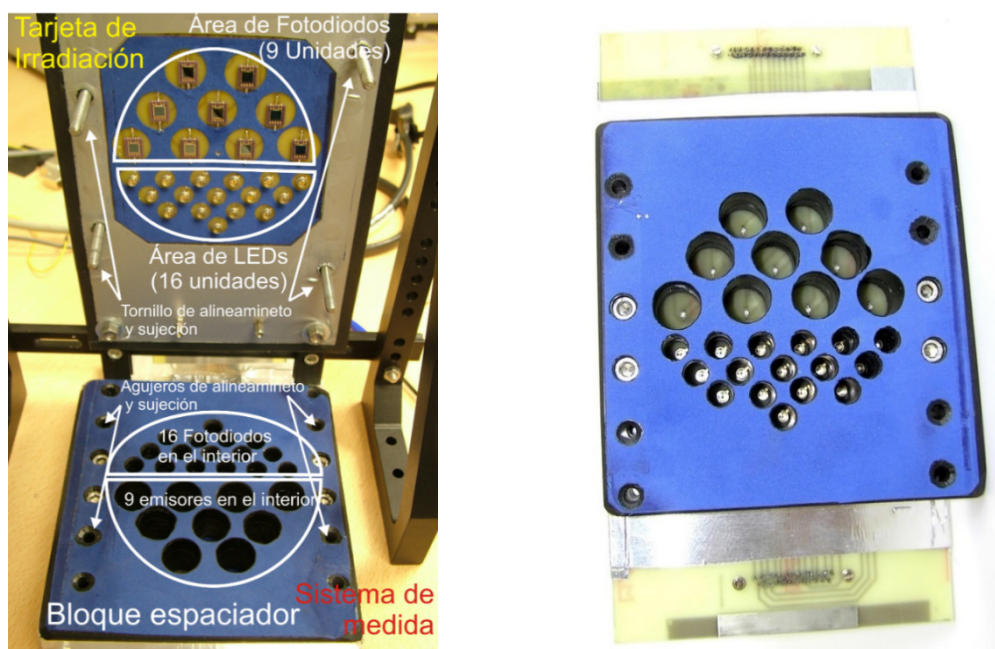


Fig. 3-16. Partes de la tarjeta de irradiación y del sistema de medida. Se aprecian los emisores y detectores en el interior de los agujeros espaciador de delrin.

<sup>5</sup> Termoplástico cristalino de alta rigidez y una excelente estabilidad dimensional.

Se observó que las medidas ópticas eran dependientes de la fuerza con la que se apretaban los tornillos, así que se optó primeramente por apretarlos con una “*llave de par*” calibrada. Con posterioridad se comprobó que era suficiente el uso de un taladro-destornillador con “*carraca*” en la punta. De esta forma se ganaba mucho tiempo en el montaje y desmontaje del sistema. La Fig. 3-17 muestra el momento en el que es apretado uno de los tornillos de sujeción. En la Fig. 3-18 se muestra el sistema de medida y la tarjeta de irradiación unidas durante una de las caracterizaciones.



Fig. 3-17. Apriete de los tornillos de fijación



Fig. 3-18. Situación final de la tarjeta de medida y de irradiación

Se desarrollaron 3 tipos de tarjetas electrónicas:

**Tarjeta de alimentación.** Para alimentar los dispositivos durante la irradiación. Permite controlar la alimentación de cada uno de los dispositivos por separado.

**Tarjetas de acondicionamiento de las corrientes de los fotodiodos.** Se dispone de varias unidades con rangos de funcionamiento diferentes para poder cubrir el amplio rango dinámico necesario para caracterizar corrientes de oscuridad y fotocorrientes. Estas tarjetas son las encargadas de caracterizar el tercer cuadrante de la curva I-V tanto en iluminación como en oscuridad.

**Tarjeta para el control de los LED.** Además de distribuir la alimentación a los LED, permite sensar la corriente real y el voltaje al que está cada uno de ellos. Tiene un doble uso, excitar a los LED para las medidas de potencia óptica emitida y responsividad, y caracterizar el primer cuadrante de la curva característica I-V tanto de LED como de fotodiodos.

Cada una de estas tarjetas se conecta a la fuente de alimentación correspondiente y a un sistema de adquisición de datos (DAQ). Las fuentes de alimentación y la DAQ son controladas por una aplicación de control y adquisición.

Esta aplicación fue desarrollada en LabView y consta de 6 módulos:

1. Configuración.
2. Medida del primer cuadrante de la curva característica I-V para LED.
3. Medida del primer cuadrante de la de curva característica I-V para fotodiodos.
4. Medida de potencia óptica emitida por los LED.
5. Medida de responsividad de los fotodiodos.
6. Medida de corriente de oscuridad de fotodiodos: tercer cuadrante de la curva I-V.

La aplicación muestra un procedimiento de cómo se deben de realizar las conexiones y el modo de actuación en cada uno de los modos de medida.

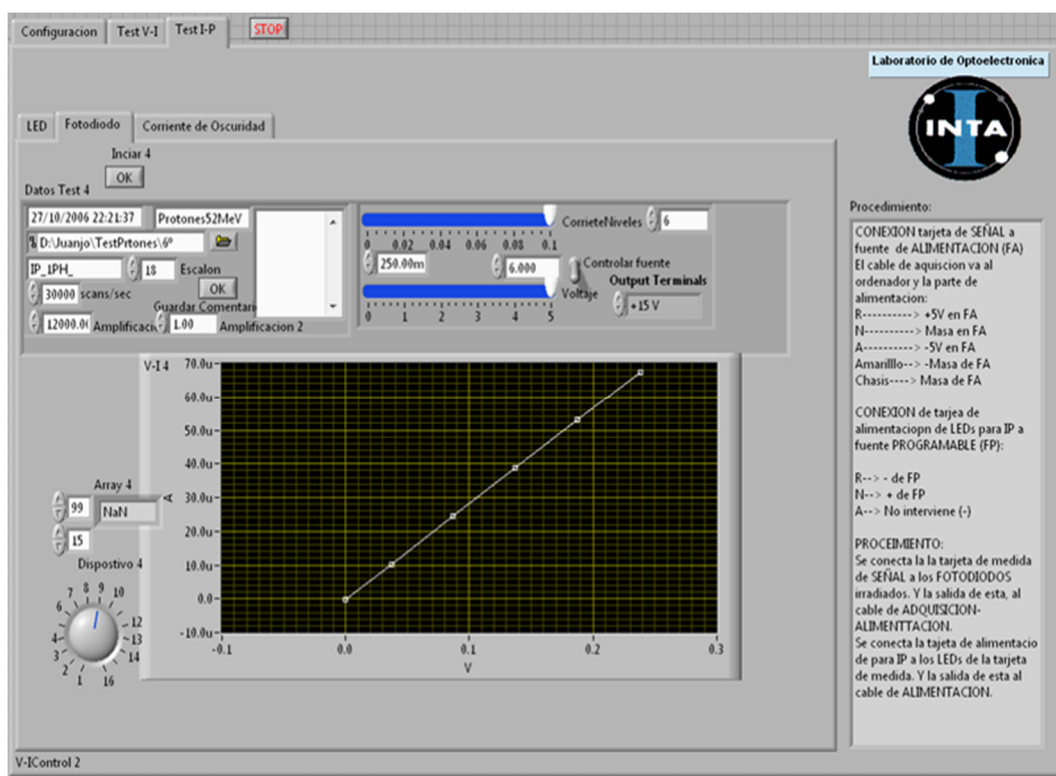


Fig. 3-19. Captura de pantalla del EGSE durante una caracterización de la responsividad



#### D. Desarrollo de las irradiaciones

Para aprovechar el tiempo contratado del haz de protones se deben de tener al menos dos tarjetas para irradiar. Durante el tiempo en el que una está siendo irradiada, la otra está siendo caracterizada y al terminar se cambia una por otra. De esta forma, el haz está siempre en marcha y se aprovecha mejor el tiempo.

El sistema opto-mecánico de caracterización debe de ser dispuesto en una sala cercana al búnker de irradiación, ahí deben prepararse también dos puestos de trabajo extras, uno de análisis de datos y otro para la comprobación y reparación de las estructuras y electrónicas, en el caso de ser necesario. Un ejemplo puede verse en la Fig. 3-20, en donde se muestra la sala de caracterización en el PIF del PSI de Suiza, durante una irradiación en 2006.

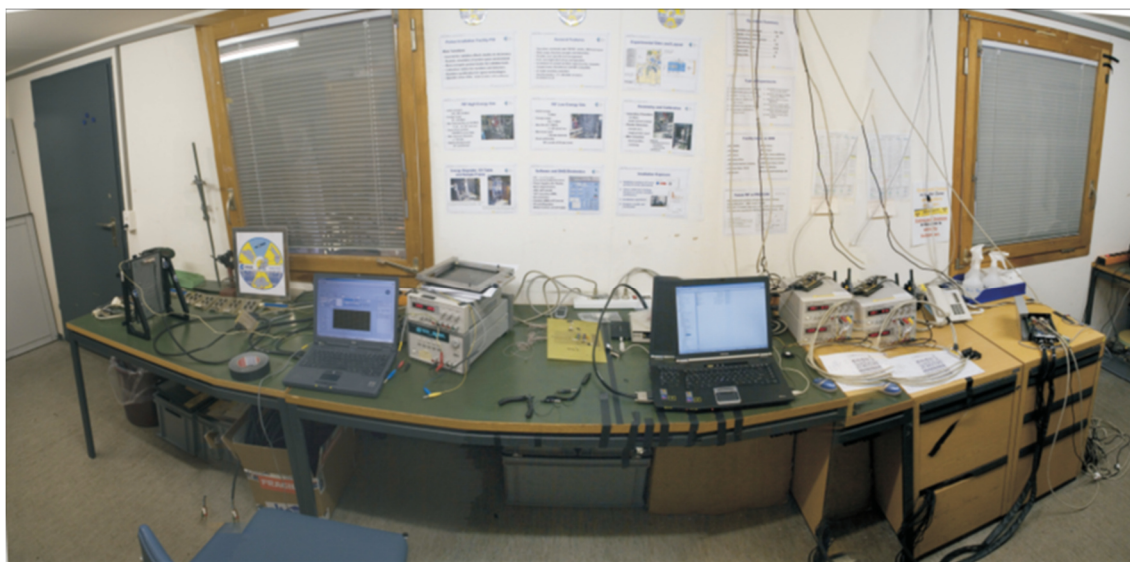


Fig. 3-20. Sala de caracterización montada en el PIF (PSI, Suiza) durante una irradiación en 2006

Es este punto conviene recordar el tema de la seguridad. Es importante tener en cuenta las normas de seguridad y manipulación de materiales radioactivos. Una instalación de este tipo, con protones de altas energías, puede activar las muestras bajo estudio. Siempre hay múltiples sistemas de seguridad, y es difícil que suceda un percance si todo el mundo tiene presente algunas normas básicas:

- **Verificar si las muestras se han activado radioactivamente** o no lo han hecho. En caso positivo, verificar el grado de activación.

- Si fuera necesario, **colocarlas detrás de un parapeto de plomo o parafina**. Los propios técnicos de la instalación se encargan de dar las recomendaciones oportunas.
- **Reducción del tiempo de exposición.**
- **Aumento de la distancia de trabajo a las muestras.**

En la Fig. 3-21 se muestra una de las tarjetas irradiadas detrás de un apantallamiento de plomo, mientras se verifica su radioactividad con un contador *Geiger*.

Es importante señalar que se debe contemplar un tiempo de estudios de “*annealing*” en la propia instalación antes de regresar, no solo por el hecho de que las primeras horas y días son cuando la recuperación es más rápida, sino porque es habitual, que aunque las muestras irradiadas sean seguras para su manipulación, tengan un cierto nivel de activación por el cual no pueden salir del área controlada. Además, a pesar de ser seguro su manejo, estos bajos niveles de radioactividad pueden dar problemas en los controles de seguridad de los aeropuertos. Así que, si parte del estudio contempla medidas de recuperación, se debe contar con realizarlos en la propia instalación de irradiación.

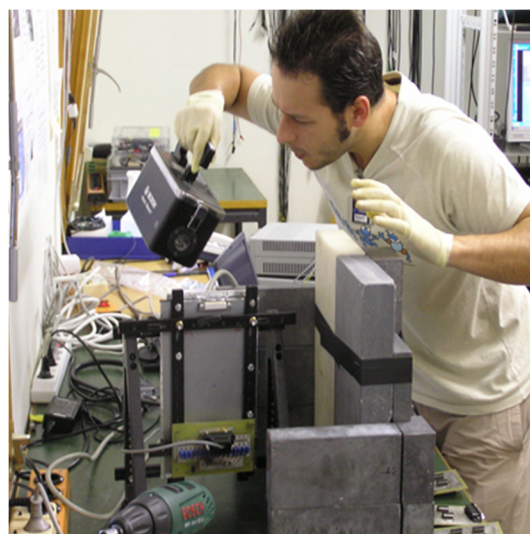


Fig. 3-21. Tarjeta irradiada detrás de un apantallamiento de ladrillos de plomo mientras se verifica su radioactividad con un Geiger en el PSI

### 3.3.2.2 Caracterización de los elementos sensibles de LDT

Para el estudio de la dependencia del factor de daño a diferentes flujos y fluencias, se prepararon 6 tarjetas en las que se dispusieron los detectores optoelectrónicos de LDT (nueve fotodiodos S5107 y diez LED S9338). En estas mismas tarjetas también se incluyeron otros LED (SFH-4610) que estaban en estudio para su aplicación en OWLS. Estas tarjetas fueron enumeradas de la 1 a la 6 y se les colocó el prefijo “OPTO” (de OPTO1 a OPTO6), para diferenciarlas de otras tarjetas que también fueron irradiadas en esta campaña.

Una vez soldado cada fotodiodo se le pego por detrás un sensor de temperatura (TMP-36) a través de un orificio practicado en la PCB. Incluir este sensor de temperatura tenía dos objetivos:

- Disponer del registro de la temperatura durante la irradiación, ya que la respuesta de los LED y los fotodiodos se ve afectada por esta magnitud.
- Irradiar los sensores de temperatura en la misma configuración en la que irían montados en LDT y verificar que no sufrían daños.

Estos sensores de temperatura sufren una fuerte degradación a partir de una TID de  $\sim 8$  krad, y son varias las irradiaciones que se realizaron para estudiar su degradación a partir de esa dosis [Gon13]. También se constató que la degradación que sufren si se les irradia con menos de  $\sim 7$  krad, es despreciable. Aun así se consideró necesario verificarlo durante este ensayo. Durante la calibración del modelo QM y del modelo FM del instrumento se volvió a verificar este hecho, tanto para los efectos de la dosis acumulada, como con efectos transitorios, concluyendo en ambos casos que, efectivamente, son despreciables (§6.4.3 y apéndice C).

Cada una de las tarjetas se irradió con unas condiciones diferentes. El objeto fue conseguir la misma fluencia pero con distintos flujos. Para conseguir igualar la fluencia con flujos de hasta 5 órdenes de magnitud de diferentes, es necesario irradiar

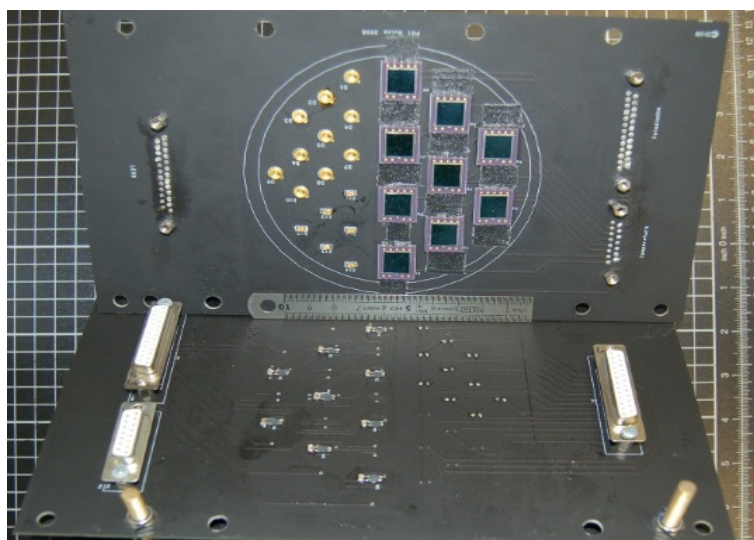


Fig. 3-22. Parte frontal y trasera de las tarjetas de irradiación para la determinación del efecto del flujo en los daños por desplazamiento

con pasos muy largos para los flujos bajos, y extremadamente cortos para los flujos altos. Por ese motivo, finalmente se llegó a un compromiso y los pasos de irradiación fueron como se muestra en la Tabla 3-2, en la que se ve que, entre la irradiación de la tarjeta “OPTO4” y la “OPTO5”, se repitió el mismo flujo ( $\sim 1 \cdot 10^7$  p<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup>·s) modificando el tiempo de irradiación, con el consiguiente aumento de la fluencia total. Esto sirvió para

poder comparar entre fluencias altas y bajas. OPTO6 fue irradiada a mayor fluencia y mayor flujo que el resto.

Tabla 3-2 Pasos de irradiación durante la determinación de la dependencia del flujo en el daño. Irradiación realizada con protones de 50,41 MeV

Tarjeta	Paso de Irradiación	Flujo [p <sup>+</sup> /cm <sup>2</sup> ·s]	Fluencia [p <sup>+</sup> /cm <sup>2</sup> ]	Duración [s]
OPTO1	1	2,00E+04	1,00E+07	500
OPTO1	2	1,87E+04	1,00E+07	535
OPTO1	3	1,13E+04	1,00E+07	885
OPTO1	4	1,08E+04	1,00E+07	930
OPTO1	5	1,03E+04	1,00E+07	967
OPTO2	6	1,12E+05	1,01E+07	90
OPTO2	7	1,01E+05	1,00E+07	99
OPTO2	8	9,20E+04	9,38E+06	102
OPTO2	9	1,32E+05	1,01E+07	76
OPTO2	10	1,05E+05	1,00E+07	95
OPTO3	11	9,79E+05	1,08E+07	11
OPTO3	12	1,02E+06	1,02E+07	10
OPTO3	13	1,01E+06	1,01E+07	10
OPTO3	14	1,05E+06	1,05E+07	10
OPTO3	15	9,67E+05	1,06E+07	11
OPTO3	16	1,03E+06	1,03E+07	10
OPTO4	17	1,05E+07	1,05E+07	1
OPTO4	18	9,16E+06	1,83E+07	2
OPTO4	19	8,14E+06	1,63E+07	2
OPTO4	20	7,99E+06	1,60E+07	2
OPTO4	21	1,03E+07	5,13E+07	5
OPTO5	22	1,06E+07	1,06E+08	10
OPTO5	23	1,04E+07	1,04E+08	10
OPTO5	24	1,03E+07	1,03E+08	10
OPTO5	25	9,86E+06	1,08E+08	11
OPTO5	26	1,00E+07	1,10E+08	11
OPTO6	27	1,00E+08	1,10E+09	11
OPTO6	28	9,97E+07	6,98E+08	7
OPTO6	29	9,71E+07	4,86E+08	5
OPTO6	30	1,01E+08	1,00E+10	99
OPTO6	31	1,01E+08	1,01E+10	100



### 3.3.3 Irradiaciones activas con protones

Para la ejecución de estas irradiaciones, solo fue caracterizada la corriente de oscuridad a un voltaje de polarización inverso constante (12V). La electrónica usada fue la misma que se usó para las irradiaciones gamma del CIEMAT, pero los montajes optomecánicos fueron radicalmente distintos: no fue necesario incorporar emisores de luz, ni espejos, ni fotodiodos de referencia, ni los apantallamientos de esos elementos. Los fotodiodos fueron colocados justo en frente de la salida del haz de protones, y por medio de un cable, de unos 2 metros, se conectaban a la electrónica de acondicionamiento de señal. Esta electrónica de proximidad estaba alejada de la salida del haz de protones, dentro de una caja de plomo y protegida por un parapeto de parafina de alta densidad. En esta ocasión, la electrónica de acondicionamiento se unía al DAQ de adquisición situado en la sala de control a 15 metros de distancia, en vez de los 6 m requeridos en la instalación del CIEMAT. Esto provocó que el ruido con el que se medía la corriente de oscuridad aumentara hasta niveles del 25% de la señal.

Desde la sala de control se tenía acceso a manejar tanto el sistema experimental y el EGSE de las tarjetas bajo ensayo, como los parámetros del haz de protones: el encendido, el apagado, la energía y el flujo de irradiación. El proceso fue cíclico y costaba de 6 pasos:

1. Medir la señal de los fotodiodos, con el haz de protones apagado.
2. Encender el haz a un flujo fijo con la energía  $E_i$  correspondiente.
3. Medir la evolución sufrida durante el proceso de irradiación para controlar el buen estado del sistema y evaluar la corriente de ionización si se desea.
4. Apagar el haz de irradiación al alcanzar la fluencia deseada.
5. Cambiar los parámetros deseados del haz de protones.
6. Reiniciar el proceso en el paso 1.

Durante este tipo de irradiaciones era importante el “oscurecimiento” del búnker de irradiación. Este había de estar totalmente a oscuras para poder evaluar la corriente de oscuridad de los fotodiodos, sin necesidad de cubrirlos. Se observaron múltiples luces, tales como los pilotos de la instrumentación y las señales de seguridad. Todas esas luces fueron meticulosamente tapadas, una a una, con una cinta opaca negra.

Con esta técnica se realizaron dos tipos de irradiaciones diferentes: las irradiaciones de los primeros apilamientos de fotodiodos (§3.3.3.1), y la caracterización del NIEL a través del aumento de la corriente de oscuridad, bajo el supuesto de poder aplicar la hipótesis de escalado del NIEL (§3.3.3.2).

### 3.3.3.1 Prototipo de LDT – Los primeros apilamientos de fotodiodos.

Aquí cabe resaltar que fue durante la preparación de estos ensayos y el desarrollo del nuevo EGSE, cuando se bautizó a este instrumento con el nombre de “Las Dos Torres”. Para la 1ª Irradiación de LDT se preparó una tarjeta de irradiación con dos apilamientos de fotodiodos, es decir, dos torres de fotodiodos (Fig. 3-23). El nombre que adquirió inmediatamente esta tarjeta fue: la tarjeta de “*Las Dos Torres*”, en alusión al segundo volumen de la novela de fantasía heroica “*El señor de los anillos*” de J.R Tolkien [Tolkien].

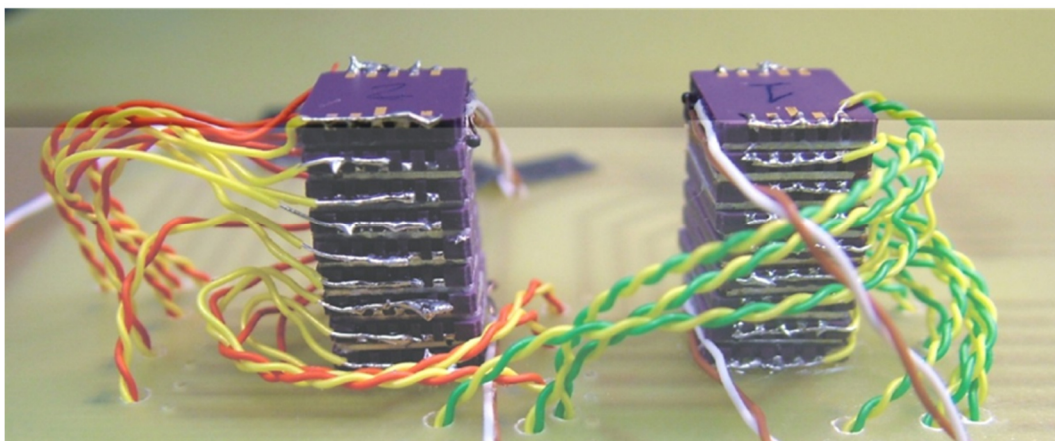


Fig. 3-23. Los dos primeros modelos de apilamientos de fotodiodos usados para la determinación del principio de funcionamiento. Los modelos mostrados son los denominados LDT-9-0.5-F\_2 (marcado con un 2) y LDT-9-0.5-T\_1 (marcado con un 1) descritos en la Tabla 2-1

Por seguir con la analogía del universo de Tolkien, se usaron nombres de lugares extraídos de sus novelas para identificar algunos indicadores del SW de adquisición. En concreto, dos temperaturas, una que mostraba la temperatura del interior del búnker de irradiación (*Tirith*), y la otra referida a la temperatura de la sala de control (*Comarca*) (Fig. 3-24). Poco después *Las Dos Torres* pasó a ser el acrónimo de *Unidades optoeLectrónicaS para un DOSímeTro y spectRómetRo Espacial* y el nombre oficial del instrumento, al solicitar un proyecto con dicho nombre.

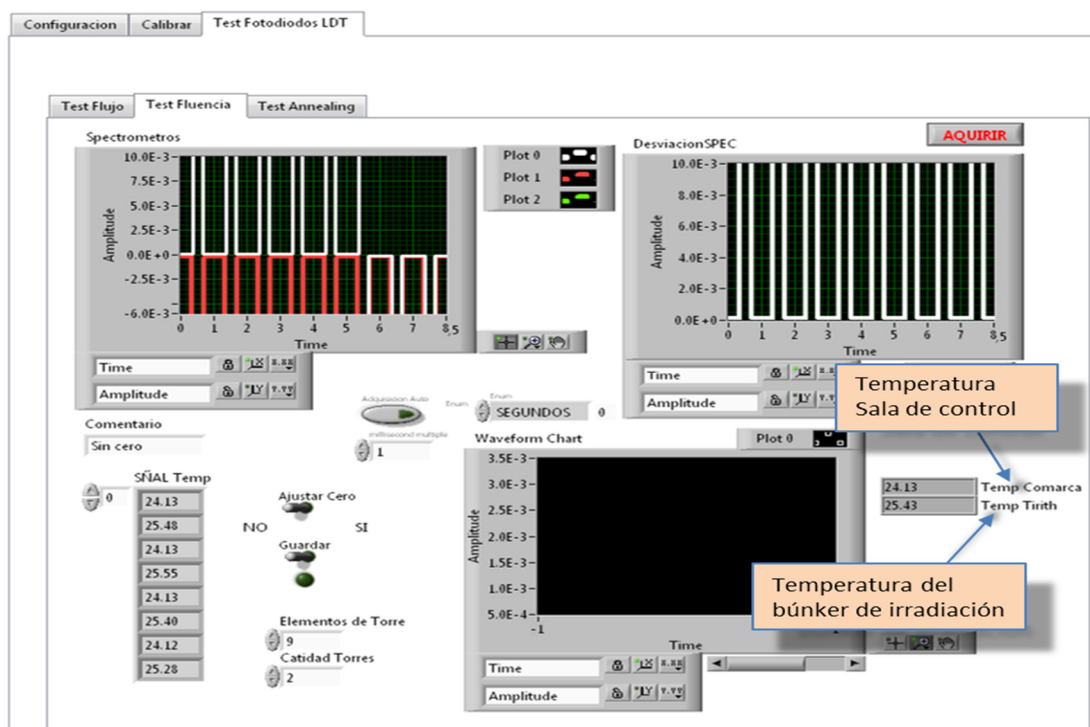


Fig. 3-24. EGSE de adquisición en el que se señalan los indicadores con los nombres de lugares de las novelas de Tolkien

Esta irradiación fue un proceso en el que se tomaba una medida de referencia, después se irradiaba a una determinada energía, se volvían a medir todos los sensores, y por comparación con la medida de referencia se determinaba el *factor de daño*. Se repetía todo el proceso cambiando la energía de irradiación. En ocasiones se realizaban varios pasos con la misma energía para reducir la incertidumbre en la determinación del factor de daño.

### 3.3.3.2 Caracterización energética – NIEL de la familia del S5107

Para caracterizar la dependencia de los DD de los fotodiodos con la energía de los protones, se prepararon tarjetas de irradiación solo con fotodiodos. En ellas se caracterizaron hasta 16 fotodiodos a la vez, distribuidos por el área del círculo de 9 cm en el que el haz de irradiación era homogéneo. Se realizó una única irradiación de este tipo, y fue sobre fotodiodos de la familia seleccionada para LDT: en total se montaron 4 dispositivos del S5107, 8 del S5106 y 4 del S7510.

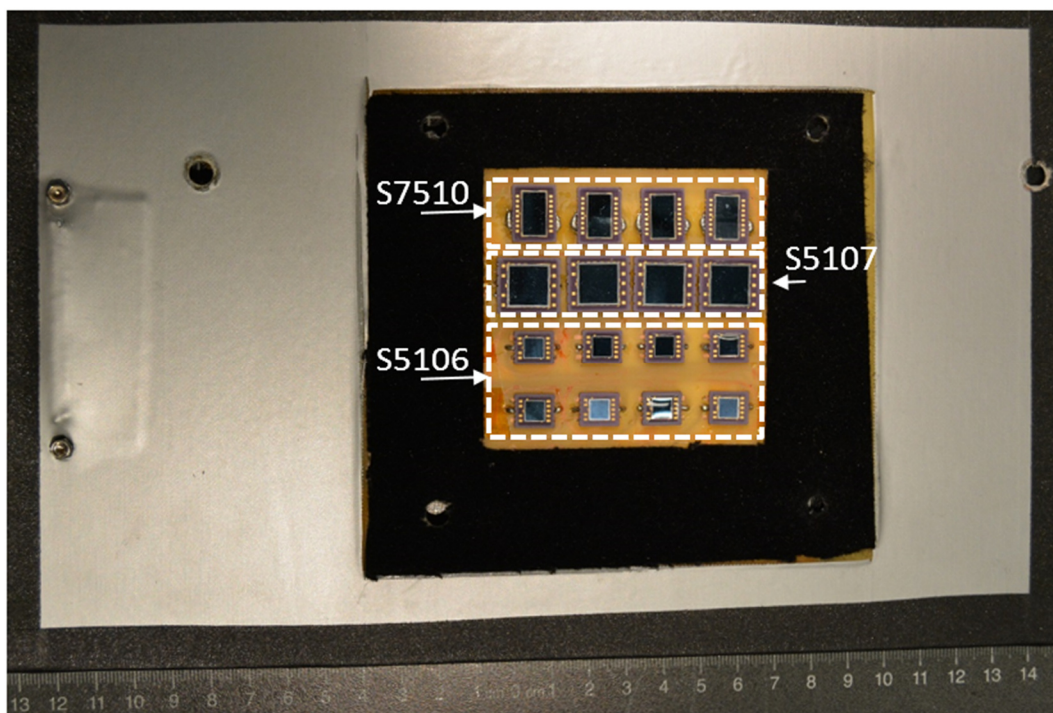


Fig. 3-25. Tarjeta de irradiación para el estudio de la dependencia del factor de daño con la energía de los protones

### 3.3.4 Irradiación para calibrar LDT

Para calibrar LDT se realizaron diferentes irradiaciones para determinar la respuesta de diferentes parámetros ante la radiación. En todas ellas se usó el mismo montaje experimental que aquí se describe. Todas se ejecutaron en el PIF del PSI y su realización constó de 5 fases:

- Instalación del sistema experimental, tanto mecánico como eléctrico.
- Acondicionamiento de la sala, apantallando todas las fuentes de luz residual para evitar contaminar la señal de oscuridad del primer piso de LDT (que se mantiene sin tapar).
- Montaje y verificación del funcionamiento.
- Alineamiento del instrumento.
- Ejecución de la irradiación de calibración.

#### A. Montaje experimental

El montaje experimental estaba formado por un sistema de adquisición y control, un conjunto de interfaces para la fijación y alineamiento del instrumento, y la



instrumentación y cableado para un control activo. Además, como se verá, fue necesario el uso de apantallamientos de radiación en algunos casos.

Para todos los ensayos realizados durante las operaciones de calibración, se usó el mismo sistema de adquisición y control, y la misma instrumentación y cableado. Sin embargo, el modo de sujetar y alinear el instrumento no fue el mismo en la calibración frontal y en determinación de las energías umbrales laterales.

En la sala de control del haz se montó el sistema de alimentación, control y adquisición de LDT, y por medio de unos cables de unos 20 m se conectó con LDT que se encontraban en el búnker de irradiación. La Fig. 3-26 muestra una fotografía de la sala de control del PIF del PSI durante la calibración de octubre de 2008. En ella se señalan las zonas en donde están los equipos de control del haz de protones (al fondo de la sala) y de control de LDT (a la izquierda de la sala). Se muestra el PC con el EGSE de control, el cable que va hasta la búnker para conectarse a LDT y las fuentes de alimentación.

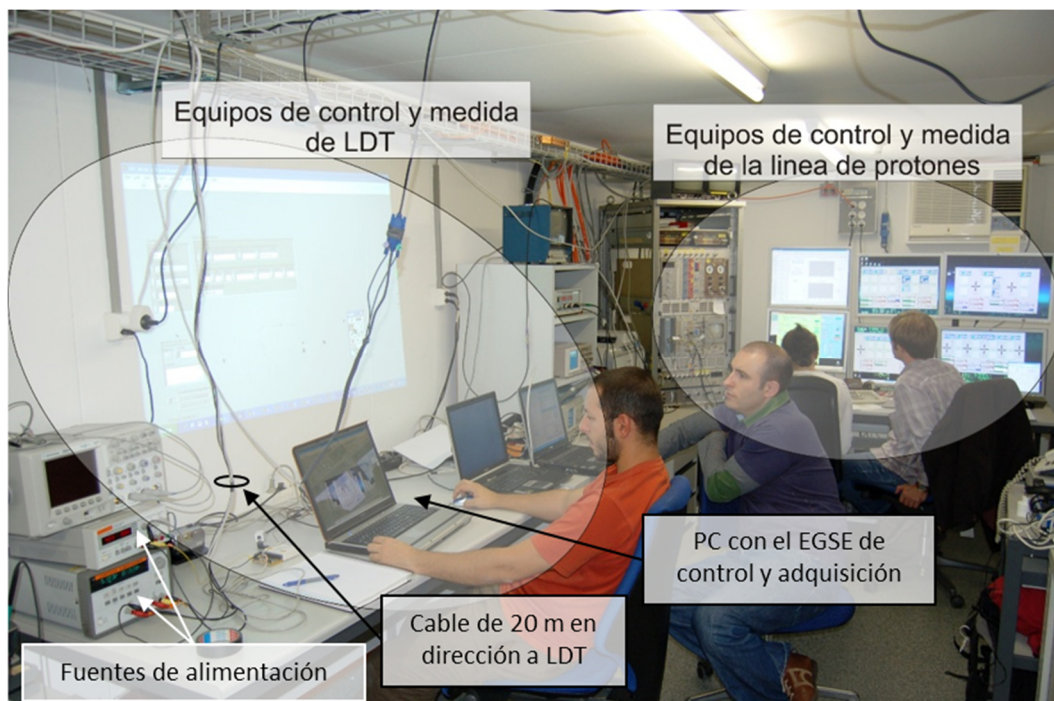


Fig. 3-26. Sala de control del PIF del PSI durante la calibración del modelo FM en 2008

Se usaron una fuente de alimentación doble y una simple para los +12 V, -12 V, +5 V y masa que hacían falta.

Para el control del instrumento fue necesario desarrollar una aplicación que simulara el protocolo de comunicación del ordenador del satélite. El protocolo de comunicación usado en el satélite era un SPI maestro/esclavo, en donde LDT es el

esclavo. Grosso modo, para explicarlo de forma sencilla, esto significa que LDT solo manda información si previamente se la piden. Una comunicación de este tipo está formada por una serie de tramas preestablecidas de bits, llamadas comandos, que le dicen a LDT lo que tiene que hacer. LDT ejecuta la orden solicitada y responde con otras tramas indicando, tanto que ha recibido el mensaje correctamente, como aportando los datos o medidas solicitados, si es que el comando indicaba esa orden.

En total, en la parte del experimento optoelectrónico de LDT<sup>6</sup> hay 4 comandos, uno que lo que hace es pedir un dato concreto, y otros tres que configuran y solicitan que se ejecute una adquisición en base a la configuración determinada.

La aplicación desarrollada para el control del instrumento, combina estos comandos para conseguir que LDT realice las medidas deseadas.

Esta aplicación tiene dos modos básicos de funcionamiento:

- **Manual**, en el que se envía uno a uno el comando deseado por el operador en cada momento. Este modo fue usado durante actuaciones excepcionales de verificación de parámetros avanzados.
- **Automático**, que tiene varios programas automáticos de actuación. Con él se puede simular el modo de operación del ordenador del satélite. Es con este modo en el que se puede realizar una adquisición completa de ambas torres de forma periódica, y es el que fue usado durante todas las caracterizaciones.

Esta aplicación tiene la capacidad de almacenar todos los datos, así como de mostrar por pantalla la evolución de las señales. Permite también hacer algunas operaciones sencillas sobre los datos: normalización, toma de referencias, calcular la variación de una señal desde un instante determinado; herramientas básicas para poder interpretar los datos en tiempo real, durante una caracterización, y evaluar si la calibración en cuestión progresa adecuadamente, o por el contrario evidencia fallos. Esto fue fundamental durante el proceso de búsqueda de energías umbral, lo cual se hacía interpretando las señales en tiempo real. La Fig. 3-27 muestra la interfaz de usuario de este EGSE.

---

<sup>6</sup> LDT es un instrumento complejo que cuenta con varios experimentos a parte del optoelectrónico, que es el tratado en esta tesis.

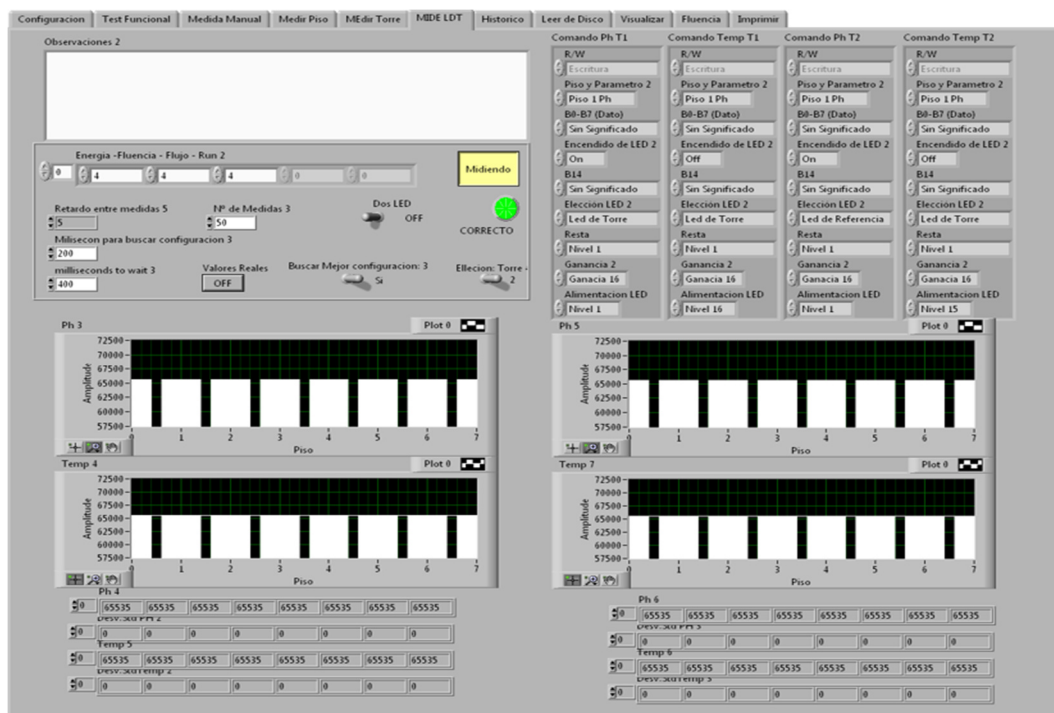


Fig. 3-27. Pantallazo de la interfaz de usuario del EGSE de control de LDT

## B. Fijación y alineamiento

El marco portamuestras de la instalación del PSI fue tomado como punto de partida para la fijación del sistema a irradiar. Pero hay ciertas diferencias entre las irradiaciones que se realizaron frontalmente y con diversos ángulos de incidencia.

### • Irradiación frontal:

Al marco portamuestras, que está unido a un posicionador XYZ, se fijó, por delante, una máscara de apantallamiento de metacrilato para dejar que se irradie solo la zona activa de LDT (y proteger su electrónica). Mientras que el instrumento fue fijado por detrás.

La máscara de metacrilato estaba unida al marco portamuestras por la zona más cercana a la salida del haz de protones. Por el otro lado se fijaron LDT usando unas escuadras, con unas monturas especiales, que deslizaban de arriba a abajo por unos carriles. Gracias a estas monturas se podía subir y bajar LDT para alinear el orificio de la máscara de metacrilato, y el área activa de LDT (Fig. 3-28).

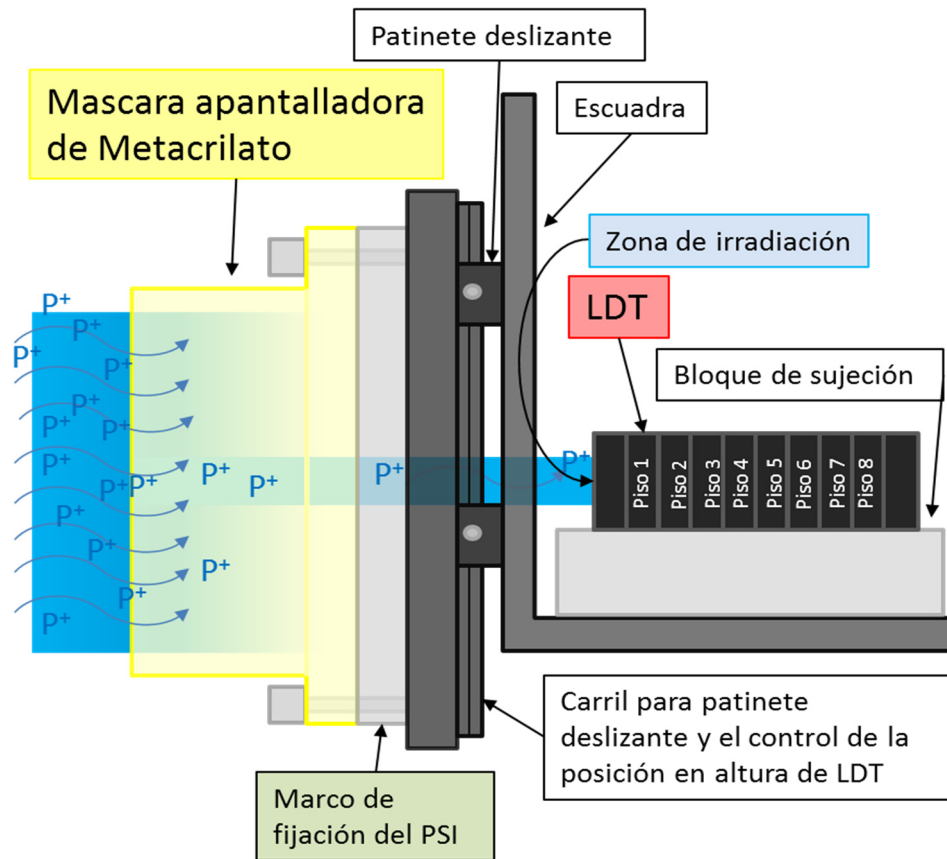


Fig. 3-28. Vista lateral del sistema de sujeción. En azul se marca la zona por donde los  $p^+$  inciden

El uso del apantallamiento de metacrilato tenía algunos puntos cuestionables:

- Posible generación de radiación secundaria, que podría afectar de forma diferente a la degradación de los elementos sensores y, con ello, a la calibración. Para reducir este efecto se sobredimensionó el espesor de la máscara.
- Modificación de la uniformidad del haz de protones. Se caracterizó espacialmente el haz para corregir este efecto, pero introdujo más complicación en el proceso de calibración y en el de análisis, y contribuyó al aumento de la incertidumbre de los resultados.
- Irradiar solo la cabeza sensora, y no la electrónica que interviene en la señal, no es la calibración del instrumento completo. Esto podría dejar sin incluir en los parámetros de calibración, tanto de los DD como de las señales de ionización, posibles degradaciones o generación de corrientes que otros elementos electrónicos pudieran añadir, o sustraer, a la señal de los transductores. Esto no tiene por qué afectar, pues en teoría, todos los elementos de la cadena de



adquisición habían sido probados en ciertas condiciones de irradiación y un posible efecto de la radiación en ellos, se consideraba despreciable.

El uso del apantallamiento era un requisito de proyecto para preservar la integridad global del modelo de vuelo de LDT durante la calibración. Se realizó en metacrilato, y se le dio un grosor de 20 cm, que fue el recomendado por los técnicos del acelerador para las energías que se iban a usar. Se le practicó un orificio rectangular para dejar sin apantallar la zona activa de LDT.

En la Fig. 3-29 se muestra la estructura de metacrilato, sus bordes han sido remarcados con líneas amarillas para identificarlo más fácilmente.

Para colocar todo el conjunto en el centro del haz de protones, se usaba el posicionador XYZ del marco del PSI. Y como la estructura tenía un peso considerable (~ 5,5 kg), se colocaron debajo unas plataformas regulables en altura que la sujetaban.

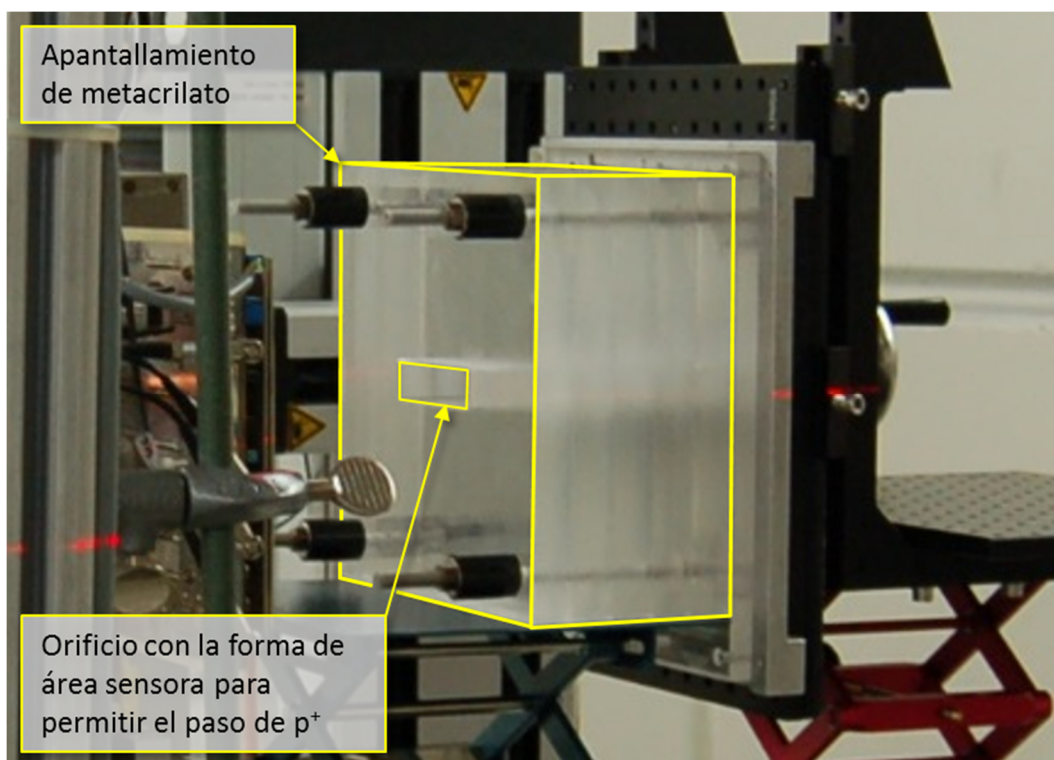


Fig. 3-29. Fotografía de la máscara de metacrilato, se han resaltado los bordes en amarillo para facilitar su identificación. Se señala además el orificio rectangular enfrente del área sensora de LDT

Una vez alineadas, LDT quedaron frente a la abertura de la máscara de metacrilato y alineadas con la última parte del cañón de protones, su cámara de ionización, la cual registra en todo momento la radiación radiada. En la Fig. 3-30 se muestran 4 fotografías de varias vistas del montaje: la fotografía “a)” es una vista lateral; en la “b)” se muestra

una visión desde arriba; la “c)” es la visión que tiene LDT desde su posición, con la apertura del apantallamiento frontal de metacrilato y la cámara de ionización justo detrás; y la “d)” es una visión panorámica de toda la sala en la que se ven todos los elementos.

El posicionado y alineado de LDT fue un proceso crítico, especialmente por el uso de la estructura de metacrilato, la cual recortaba el área de homogeneidad del haz de protones. Un error en el posicionamiento hubiera introducido grandes errores en la calibración.

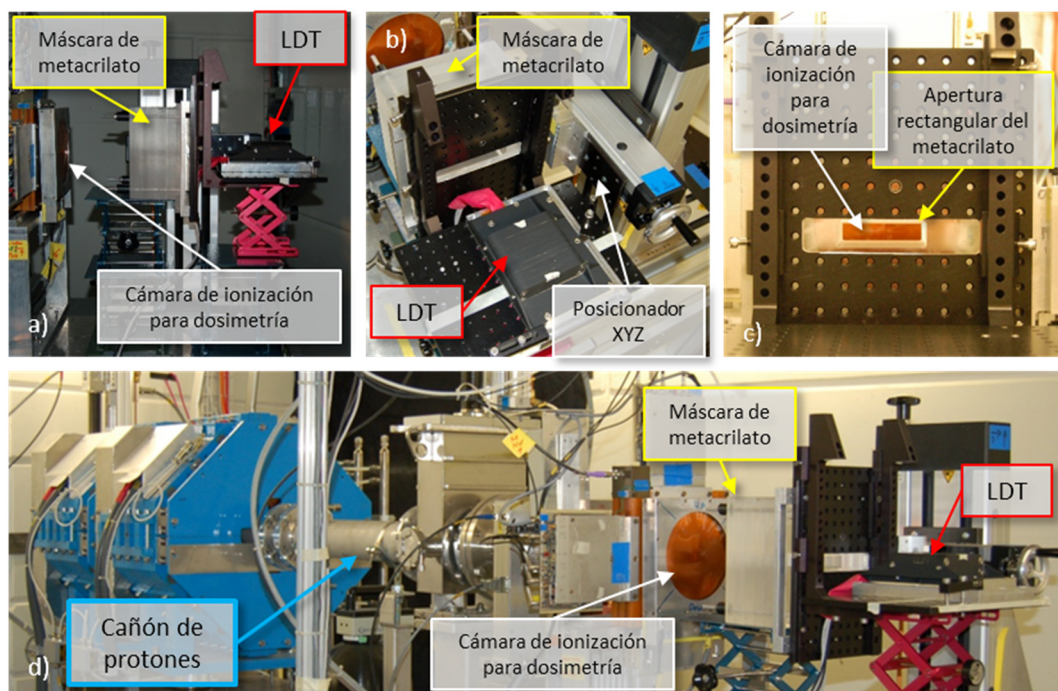


Fig. 3-30. Fotografías de los elementos que fijan y alinean la máscara y LDT centradas en el haz de protones: a) vista lateral; b) vista desde arriba; c) vista desde la posición de LDT; d) vista general del final del cañón con todo el sistema montado y alineado

Para mover el sistema respecto al haz se usaba el posicionador XYZ del marco porta-muestras; y para saber cuál es el centro del haz, la instalación facilitaba una cruceta láser de alineación que marcó el plano horizontal y el vertical. La distancia a la salida del cañón, menos crítica, se midió con una cinta métrica. En la Fig. 3-31 se muestran 4 fotografías con los detalles del proceso de alineamiento, se han marcado con flechas amarillas las proyecciones de los láseres de alineamiento horizontal y vertical: la fotografía “a)” muestra la colocación de la altura del sistema con la máscara de metacrilato, se aprecia el láser horizontal que marca la altura de trabajo; en la “b)” el Dr. Wojtek Hajdas, el responsable de la instalación PIF del PSI aparece midiendo la distancia exacta a la que debe de ser colocada LDT; en la “c)” alineamiento horizontal de LDT

usando el láser que marca el plano vertical; en la “d)” alineamiento vertical de LDT usando el láser que configura el plano horizontal.

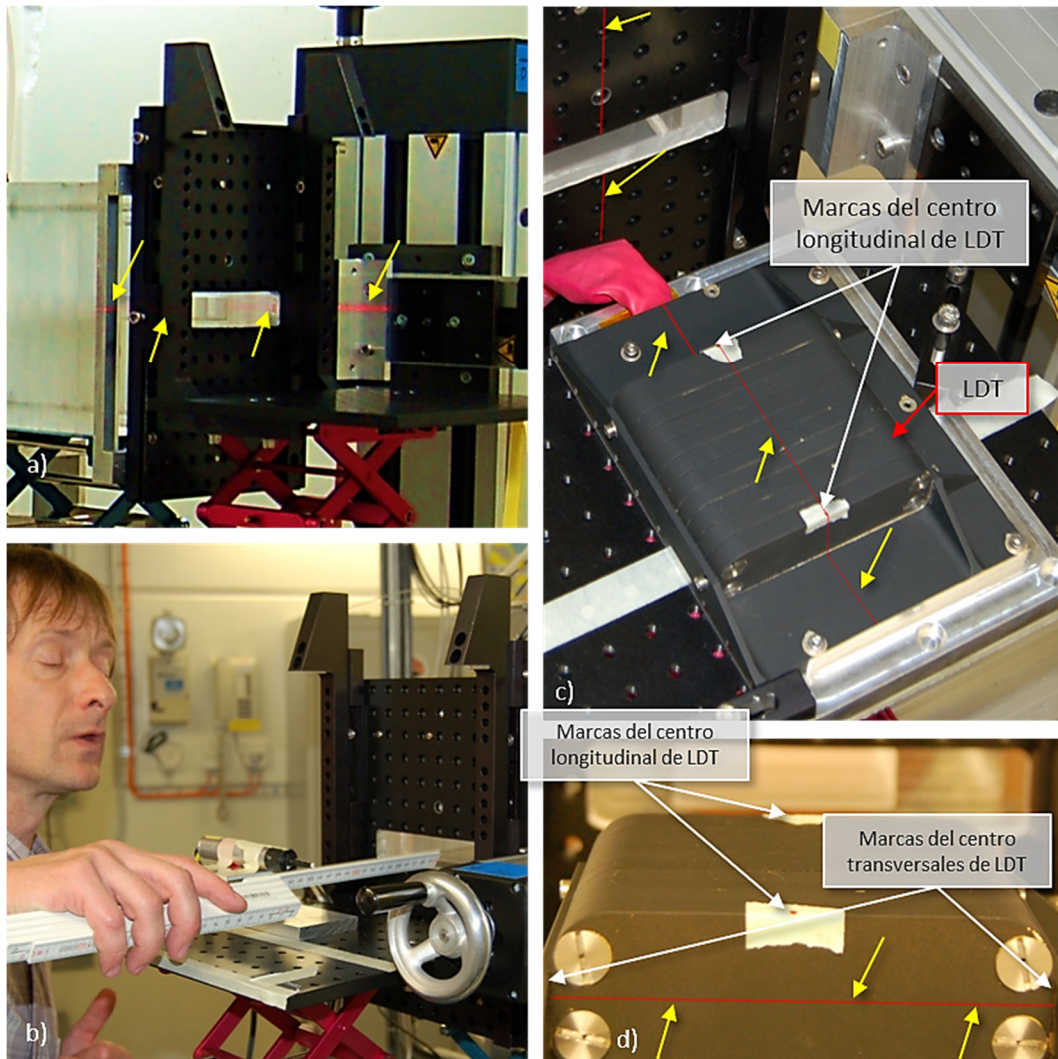


Fig. 3-31. Fotografías de la disposición de LDT durante los preparativos de alineación para la calibración frontal: a) posicionando la estructura de sujeción con la máscara de metacrilato; b) fijando la distancia de trabajo; c) alineando LDT respecto a sus marcas horizontales; d) colocando LDT a la altura correcta

- **Irradiación lateral**

Para la fijación de LDT en los ensayos laterales, LDT tuvo que ser montada sobre un goniómetro, que permitía rotar el instrumento en frente del acelerador. Esta rotación se realizó en torno a dos ejes de rotación diferentes. Estos ejes fueron ejes perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de LDT; uno de ellos giraba la torre horizontalmente y el otro la giraba verticalmente. La Fig. 3-32 muestra los ejes de giro seleccionados.



El montaje fue parecido al del caso de la calibración de frente, la diferencia estriba en que en este caso, no se usó el apantallamiento de metacrilato frontal, y en que en la plataforma que se sujetaba al marco porta muestras del PSI, se colocó un rotador.

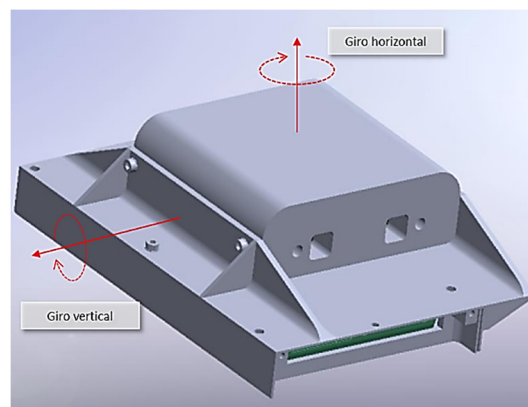


Fig. 3-32. Los ejes de giro horizontal y vertical marcados en rojo sobre una representación en 3D de LDT

Para realizar las rotaciones horizontales, LDT fue colocada horizontalmente y fijada al rotador haciendo coincidir el eje de giro del rotador con el centro de LDT (ver el esquema de la Fig. 3-33). Para el giro vertical, LDT fue fijada sobre el rotador levantada sobre uno de sus laterales, tal y como se muestra en la Fig. 3-34.

Esta estructura descrita fue montada, al contrario que en el caso de la calibración frontal, en la parte delantera del marco porta muestras, en el lugar donde había estado puesta la máscara de metacrilato. Tampoco se montaron las escuadras sobre el carril deslizante. Para el ajuste de la altura respecto del haz de protones se usó primero el posicionador XYZ al que está sujeto el marco porta muestras y después, para el ajuste fino, se usó el propio rotador, el cual era ajustable en altura.

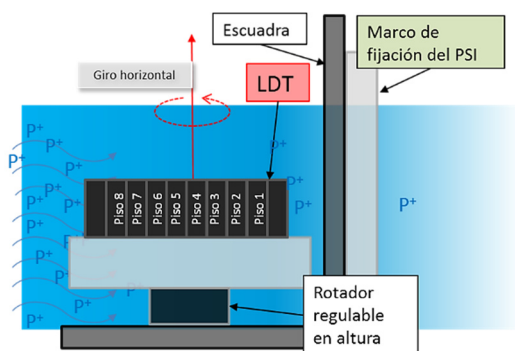


Fig. 3-33. Esquema de montaje de sujeción para los giros horizontales

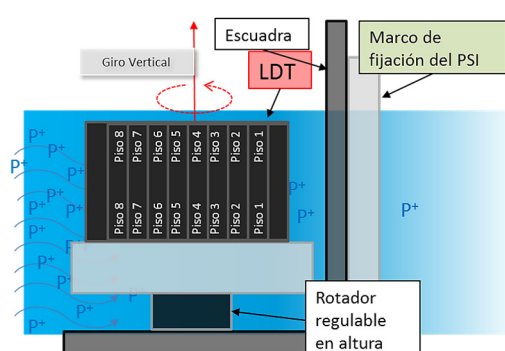


Fig. 3-34. Esquema de montaje de sujeción para los giros verticales

La máscara de apantallamiento de metacrilato no fue usada porque, en la disposición vertical, el área a irradiar era de mayor tamaño que lo que permitía irradiar dicha máscara. Además, se había demostrado durante la irradiación frontal, que la dosis máxima total acumulada era suficientemente baja para no afectar a la electrónica de control de LDT. Además, se usó el modelo QM (*Qualification model* – Modelo del

instrumento desarrollado solo para pruebas ambientales y para verificar su correcto funcionamiento en condiciones espaciales).

Los ángulos elegidos para la irradiación estaban definidos en función de la geometría de LDT, el alineado se realizó con los láseres que marcaban el plano horizontal y vertical del haz de protones. En cada posición angular de medida, se marcó sobre el propio instrumento la línea del láser de alineamiento con la ayuda de una cinta adhesiva de alta calidad de color amarillo, y marcando sobre ella una línea por el punto por el que pasaba el láser. La distancia al haz se estableció con una cinta métrica.

Las figuras Fig. 3-35 y Fig. 3-36 muestran algunas fotografías de LDT puesta en el montaje horizontal y en el vertical respectivamente. Se señalan algunos componentes nombrados líneas más arriba, así como, con flechas amarillas, la traza roja sutil del láser de alineamiento. Se aprecian las cintas adhesivas amarillas, por diferentes zonas, marcando los puntos de alineamiento con el láser.

Este fue un montaje específico, único y complejo, totalmente adaptado al instrumento y necesidades concretas de LDT, por lo que, debido a ello, no había ninguna referencia de algo parecido en la literatura, ni existía ningún sistema comercial que se pudiera haber utilizado.

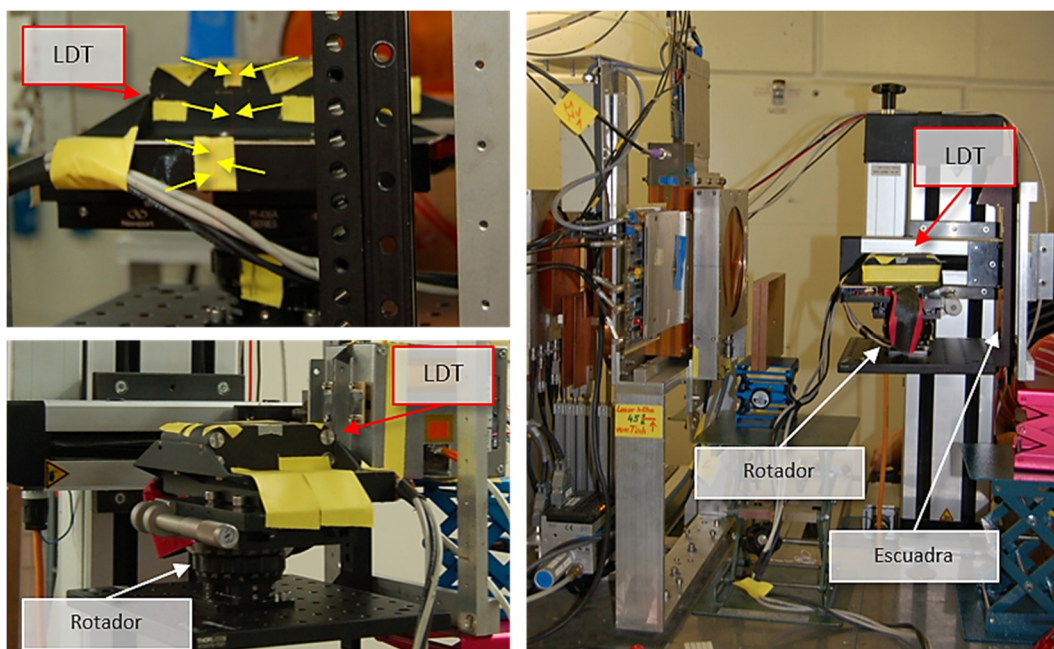


Fig. 3-35. Fotografías de LDT situadas sobre el rotador para realizar los giros horizontales. Determinación de las energías umbrales laterales del QM en 2010

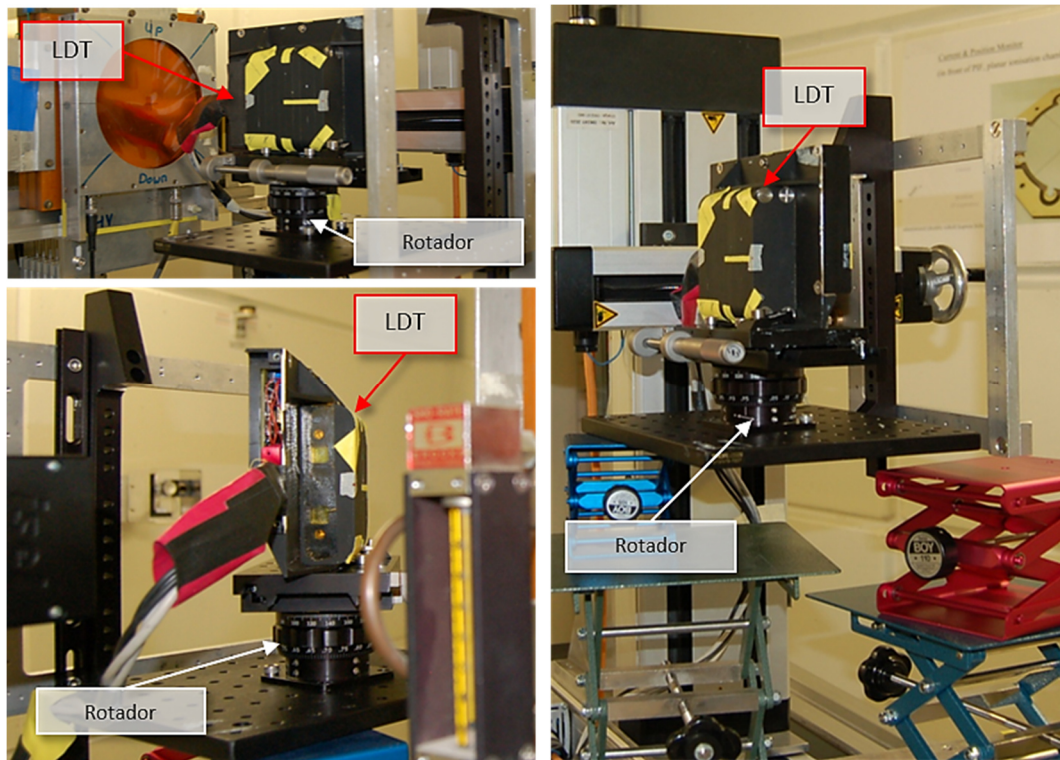


Fig. 3-36. Fotografías de LDT situadas sobre el rotador para realizar los giros verticales. Determinación de las energías umbrales laterales del QM en 2010



## **4 Los dispositivos detectores de radiación de LDT**

*Se describen los resultados de las irradiaciones realizadas para la selección de los fotodiodos y LED empleados en LDT.*

*Se describen también los resultados de las irradiaciones de caracterización que incluyen la dependencia de la respuesta de los dispositivos seleccionados con la energía, la fluencia y el flujo de los protones incidentes. Se ha encontrado que la dependencia energética coincide con la función NIEL obtenida por otros autores, lo cual refrenda el método de medida empleado.*



## 4.1 Selección de los detectores

La selección de los detectores para LDT tiene su origen en los ensayos de radiación realizados para el estudio y selección de fotodiodos y LED para el desarrollo del sistema de Comunicaciones Ópticas Difusas en el interior del satélite OWLS (*Optical Wireless Links for intra-Satellite communications*) [Arr09], [Arr11], [Tam10], [Rod08], [Gue07] y [Gue06].

Esta selección se inició teniendo en cuenta características ópticas, eléctricas y los rangos ambientales de funcionamiento. Dentro de las características ópticas se seleccionaron emisores con una alta potencia óptica de emisión en el infrarrojo cercano (NIR), concretamente la denominada primera ventana (centrada en 850 nm). Se seleccionaron fotodiodos PIN de silicio de áreas y responsividades grandes. La velocidad de los dispositivos, para temas de comunicaciones, también era otro factor importante que influyó en la selección. En este sentido se tuvo en cuenta que presentasen las características eléctricas adecuadas, tales como resistencia serie, capacidad parásita, etc. Pero lo fundamental para su uso en misiones espaciales era que soportasen las condiciones ambientales del entorno espacial. Por este mismo motivo fueron seleccionados en función de su rango térmico de funcionamiento y del material de sus encapsulados. Los encapsulados metálicos y cerámicos suelen comportarse mejor en ambientes agresivos. Pero la parte crucial de la selección vino de la mano de los ensayos ambientales y de calificación: se realizaron pruebas térmicas, de degasificación, análisis de rayos X y como no, ensayos de radiación. Estos ensayos de radiación fueron el punto de partida de este trabajo de tesis.

En total se irradiaron, a lo largo de 3 años, más de 300 muestras de 19 tipos diferentes de fotodiodos de 5 fabricantes, y 31 de LED de 8 fabricantes, en condiciones similares y con el mismo método de medida.

Estos ensayos, además de permitir identificar los mejores candidatos para su uso en comunicaciones ópticas, mostraron algunos parámetros interesantes para ser usados como detectores de radiación. En particular, se identificaron parámetros que sufrían grandes degradaciones en algunos de los dispositivos, y este fue el primer paso para la selección de los dispositivos detectores de radiación de LDT. En este apartado, se resumen los resultados relevantes aplicados a esta selección de componentes para LDT.

Los ensayos se ejecutaron entre 2003 y 2006. Los primeros fueron para estudiar la degradación de los encapsulados ópticos bajo dosis total de ionización (TID – *Total Ionizing Dose*), y se empleó la fuente de  $^{60}\text{Co}$  de la instalación NAYADE del CIEMAT (§3.2.1.1). El resto de ensayos, fue para evaluar los daños por desplazamiento (DD) con protones, en los propios dispositivos. Estas pruebas tuvieron lugar en las instalaciones LIF de la UCL (§3.2.2.1), el RADEF de la Universidad de Jyväskylä (§3.2.2.2) y el PIF del PSI (§3.2.2.3). Los resultados de estas irradiaciones fueron publicados entre el 2004 y el 2007 en [Jim04] [Jim05] [Jim06] [Jim06a] y [Jim07]. En esta sección se han extraído los resultados más relevantes en relación a LDT.

Estos ensayos se podrían haber realizado directamente con protones, y haber evaluado el efecto conjunto de la ionización (sobre las ventanas transparentes) y de los DD (sobre el semiconductor). Pero existían una serie de razones que llevaron a hacerlo en dos pasos. A la falta de experiencia en la preparación y ejecución de este tipo de ensayos, se le unieron las complicación que sería prepararlo fuera de España, y el coste económico de los ensayos con protones. La principal ventaja de hacerlo así, fue que la preselección con rayos  $\gamma$  dio la experiencia necesaria para afrontar los ensayos de DD con mayor seguridad.

La tabla 4-1 muestra las irradiaciones realizadas con rayos  $\gamma$  indicando la fecha de ejecución y el tipo de muestras irradiadas, y la tabla 4-2 las realizadas con protones:

Tabla 4-1. Irradiaciones con rayos  $\gamma$

Código Irradiación	Fecha de inicio	Instalación [País]	Fuente	TID	Componentes Irradiados
#1 Gamma	17-3-03	NAYADE/CIEMAT [España]	$^{60}\text{Co}$	~ 100 krad	Fotodiodos
#2 Gamma	10-4-03				
#3 Gamma	11-3-04				

Tabla 4-2. Irradiaciones con protones

Id. irradiación	Fecha	Instalación [Pais]	Energías		Fluencia [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>10</sup>	Componentes irradiados
			[MeV]			
#1p <sup>+</sup>	14-9-04	LIF/UCL [Bélgica]	50		208	Fotodiodos LED
#2p <sup>+</sup>	3-3-05		50		281	Fotodiodos LED
#3p <sup>+</sup>	7-12-05		30 y 60		231	Fotodiodos LED
#4p <sup>+</sup>	9-6-06	RADEF [Finlandia]	50		222	Fotodiodos LED
#5p <sup>+</sup>	1-7-06	PIF/PSI [Suiza]	50		550	Fotodiodos LED
#6 p <sup>+</sup>	23-10-06		50		1,23	Fotodiodos LED
#7p <sup>+</sup>	14-2-07		10,76	14,59	0,4	Familia S5107 [Fotodiodos]
			20,63	25,34		
			30,29	39,92		
		49,85	62,51			

La última irradiación mostrada en la tabla (Familia del S5107) es, en realidad, una irradiación muy diferente al resto. Sus resultados fueron clave de cara a tomar la decisión de seleccionar este fotodiodo. Se hace referencia a la misma en esta sección, si bien sus resultados son explicados posteriormente (§4.2).

#### 4.1.1 Irradiación de fotodiodos con rayos $\gamma$

En las tres irradiaciones realizadas en las instalaciones NAYADE del CIEMAT, se irradiaron 6 clases de fotodiodos PIN de silicio. La tabla 4-3 indica las características más relevantes de los fotodiodos de HAMAMATSU, y la tabla 4-4 las de los de Vishay. En total fueron irradiadas 8 muestras de cada tipo, los resultados que aquí se muestran corresponden a la media de los resultados de todas ellas. Los errores de medida fueron estimados por medio de la desviación estándar de la media de todas las muestras.

Tabla 4-3. Fotodiodos de HAMAMATSU irradiados con rayos  $\gamma$  entre 2003 y 2004

Id. del fabricante	Área [mm <sup>2</sup> ]	Corriente de oscuridad @ 25°C [pA]	Responsividad máxima [A/W]	Lente / Filtro óptico
S1223	6,6	200	0,6	No/No
S3883	1,7	50	0,6	No/No
S5106	25	400	0,72	No/No

Tabla 4-4. Fotodiodos de Vishay irradiados con rayos  $\gamma$  entre 2003 y 2004

Id. del fabricante	Área	Corriente de oscuridad @ 25°C	Responsividad máxima	Lente / Filtro óptico
	[mm <sup>2</sup> ]	[pA]	[A/W]	
BPW34	7,5	2	0,67	No/No
BPW34F	7,5	2	0,59	No/Si
BPX61	7	2	0,62	No/No

En este apartado se describe cómo evoluciona la corriente de oscuridad de estos fotodiodos en función de la dosis total de ionización y en función de la tasa de dosis instantánea. Para ello se muestra, en la Fig. 4-1, extraída de [Jim04], la evolución típica de la corriente de oscuridad en función del tiempo.

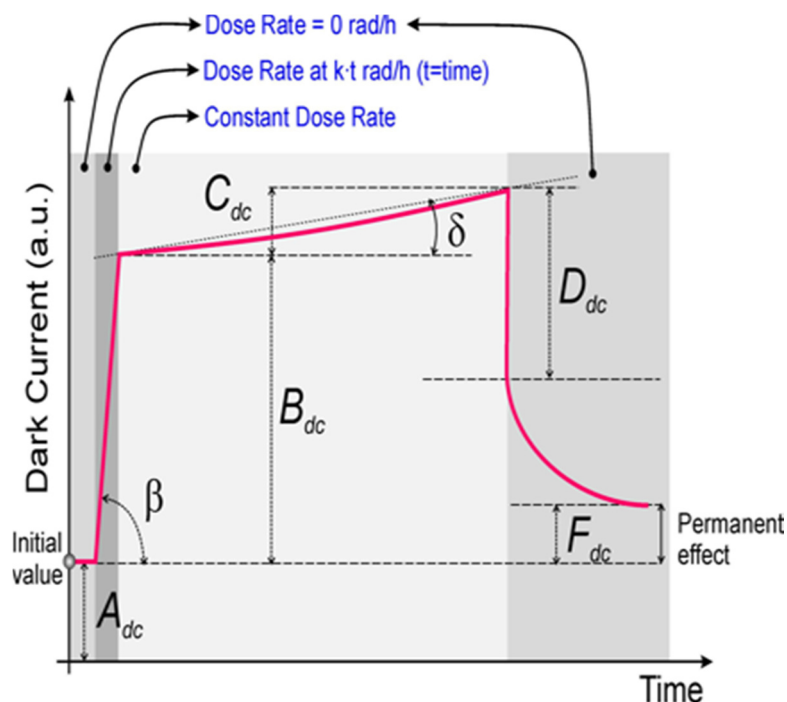


Fig. 4-1. Evolución de la corriente de oscuridad durante el ensayo [Jim04]

En ella se distinguen,

claramente, 4 zonas marcadas en la figura con fondos de diferentes tonalidades de gris:

**Zona 1**, antes de iniciar la irradiación. Esta zona está caracterizada por el valor  $A_{dc}$ , el cual representa el estado inicial de la **corriente de oscuridad**. La tasa de dosis es 0 rad/h pues la capsula, con las muestras a irradiar, no ha sido introducida en la piscina con las fuentes de  $^{60}\text{Co}$ .

**Zona 2**, que es la de evaluación de la **sensibilidad a la ionización directa**. Esta zona se caracteriza por el aumento progresivo en la tasa de dosis. La señal en oscuridad es proporcional a esta, y por tanto aumenta progresivamente. Se trata de un efecto transitorio, no permanente. Esta zona se caracteriza por la pendiente que forma la señal generada por el fotodiodo con la tasa de dosis (la “ $\tan \beta$ ” en la Fig. 4-1). Es decir, el aumento de la corriente en oscuridad por unidad de tasa de dosis, expresado en A/(rad/h) o A·h/rad.

**Zona 3**, en la que se mantiene constante la tasa de dosis. En esta se evaluará el efecto de la dosis total acumulada, el llamado **factor de daño** [Lar68], [Mes92] que es el aumento de la corriente de oscuridad por unidad de dosis total [A/rad].

**Zona 4**, en la que se produce la recuperación (*annealing*). Cuando el ensayo de radiación ha terminado y se saca la capsula de la piscina, la tasa de dosis vuelve a ser cero y la señal sufre una repentina bajada de nivel debido a la ausencia de ionización. Esta gran bajada es similar a la subida sufrida al inicio de la irradiación ( $B_{dc} \approx D_{dc}$ ). Después, poco a poco, se produce el *annealing* natural. Se puede expresar como un porcentaje de la recuperación, es decir, un valor de un 100% indica que la señal ha vuelto al estado original. Un 0% indicaría que no ha habido recuperación alguna. Un valor negativo de este porcentaje indicaría que la señal se degradó, aún más, durante este tiempo.

La tabla 4-5 muestra los resultados de las 4 zonas descritas para las irradiaciones con rayos  $\gamma$ . El sistema experimental solo estaba preparado para medir con precisión las variaciones de las señales de forma relativa, así que los resultados obtenidos están expresados en % de variación respecto del valor inicial. Se ha tomado, para expresar los resultados experimentales en valor absoluto, el teórico suministrado por el fabricante en su hoja de características como valor inicial.

Tabla 4-5. Resultados de la degradación de la corriente de oscuridad de los ensayos de TID

Fotodiodo	Corriente de oscuridad teórica <sup>1</sup>	Sensibilidad a la Tasa de Dosis <sup>2</sup>	Factor de daño <sup>2</sup>	Factor de daño Post-recuperación <sup>2</sup>	Recuperación [100% = Recuperación Total]
	[pA]	[pA·h/rad]	[fA/rad]	[fA/rad]	
S5106	200	6,7	14	8,4	42%
S1223	--	--	--	--	--
S3883	50	0,24	3,7	5,0	-35%
BPW34	2000	31	230	260	-10%
BPW34F	2000	33	160	260	-60%
BPX61	2000	30	1200	720	39%

<sup>1</sup> Dato suministrado por el fabricante

<sup>2</sup> Dato calculado a partir de los datos experimentales del ensayo de radiación y la corriente de oscuridad teórica del dispositivo

La incertidumbre de estas medidas no supera, en ninguno de los casos mostrados, el 35%.

En la Fig. 4-2 se han representado los datos de la tabla anterior. Se observa una diferencia entre los dispositivos de la marca *Hamamatsu* y los de *Vishay*. Claramente, los fotodiodos de *Hamamatsu* son menos sensibles a los daños permanentes ocasionados por la radiación ionizante.

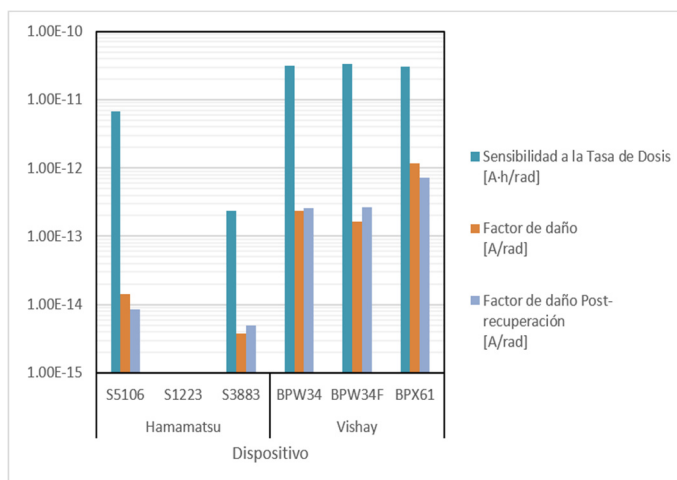


Fig. 4-2. Resultados de la degradación de la Corriente de Oscuridad de los ensayos de Irradiación ionizante

Como se verá más adelante, los valores aquí obtenidos (entre 10 y 100 fA/rad) son tres órdenes de magnitud inferiores a los daños producidos por efectos de los DD con protones. Además, se observa una recuperación de casi el 50% en tan solo dos días, por lo que el daño real en tasas de dosis bajas, puede ser despreciable.

Respecto a los efectos transitorios, la diferencia es algo menor entre los de un fabricante y el otro. Ambos podrían ser usados como sensores de tasa de dosis. Este aumento de la señal en oscuridad es despreciable frente a señales de iluminación. Por ello, el uso de fotodiodos de silicio en aplicaciones de comunicaciones ópticas (OWLS) no planteó problema alguno.

Estos valores son del mismo orden que los producidos por la ionización directa bajo irradiación con protones, y por ello se pensó que también podrían ser empleados como detectores para medir flujos de protones en vuelo.

Como se adelantó en la introducción de la tesis, los dispositivos optoelectrónicos se ven poco dañados por los efectos de ionización. Sin embargo, los materiales transparentes presentes en sus encapsulados se oscurecen por la formación de centros de color. Es por eso que se incluyeron los ensayos  $\gamma$  en el proceso de selección de los emisores y detectores de luz, en el marco del proyecto OWLS. En particular, se caracterizó la degradación de la responsividad, la cual se ve afectada (a nivel de conjunto) si las ventanas y filtros de estos dispositivos cambian su transmitancia óptica.

La fotosensibilidad en función del tiempo de irradiación, se muestra en la Fig. 4-3 [Jim04]. Se vuelven a apreciar las mismas zonas descritas en el apartado anterior. Destaca que los parámetros A, B y C han resultado ser realmente pequeños, con valores inferiores al 2% tras

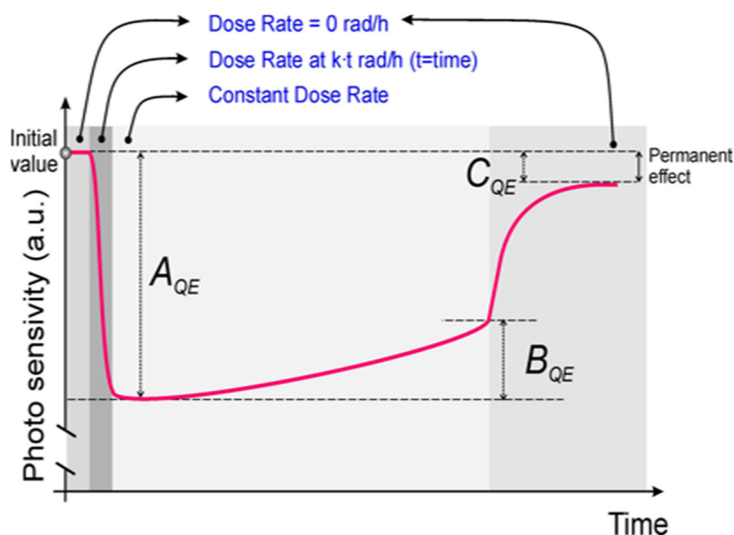


Fig. 4-3. Evolución de la fotosensibilidad durante el ensayo [Jim04]

100 krad de TID. De las 6 muestras solo 4 mostraron un cierto daño a causa de la radiación. En las otras dos el resultado quedó enmascarado por el ruido. La tabla 4-6 muestra los resultados:

Tabla 4-6. Efecto de la radiación ionizante sobre la fotosensibilidad de los fotodiodos

Fotodiodo	$A_{QE}$	$B_{QE}$	$C_{QE}$
	$[\% / (\text{rad/h})]$ $\times 10^{-3}$	$[\% / \text{rad}]$ $\times 10^{-6}$	$[\% / \text{rad}]$ $\times 10^{-6}$
S5106	4	5	3
S1223	4	-5	20
S3883	--	--	--
BPW34	3	6	4
BPW34F	--	--	--
BPX61 (a)	3	3	8

La desviación estándar de la media de los valores muestra una dispersión elevada, pero no supera en ningún caso el 35%.

La preparación y ejecución de estos tres ensayos proporcionó al equipo la experiencia y confianza suficientes, para dar el salto a la irradiación con protones. Se decidió omitir la preselección de los LED con rayos  $\gamma$  para evaluar su comportamiento, y se pasó directamente a los ensayos de radiación con protones. En estos ensayos se irradiaron tanto LED, como fotodiodos.

### 4.1.2 Irradiación con protones sobre LED

Durante las seis campañas de irradiación con protones realizadas entre finales de 2004 y finales de 2006, se irradiaron un total de 195 unidades de 31 tipos de LED, de 8 fabricantes diferentes. Los resultados de estas campañas de irradiación fueron publicados a lo largo de estos años en [Jim06], [Jim05] y [Jim04]. En esta sección se muestran los resultados en relación a la degradación de la potencia óptica de emisión, que es la magnitud sensible a los DD que se ha elegido para medir la fluencia de protones con LDT.

Para evaluar la degradación sufrida por estos dispositivos, se ha establecido una métrica que se ha denominado *tolerancia*. Está basada en el % de potencia óptica emitida por los LED tras ser irradiado con una determinada fluencia equivalente. La tabla 4-7 indica los límites de cada una de las tolerancias definidas y la cantidad de LED que han mostrado dicha tolerancia.

Tabla 4-7. Efecto de la radiación ionizante sobre la fotosensibilidad de los fotodiodos

$\Phi_{Eq. P^{+10 MeV}}$ [cm <sup>-2</sup> ]	% de potencia óptica emitida	Tolerancia	Nº de unidades
$2,5 \cdot 10^{12}$	[100 % - 75 %]	Alta – A	8
	[75 % - 20 %]	Media – M	5
	[20 % - 5 %]	Baja – B	14
	0 %	Muy baja - MB	1 [L9338 de <i>Hamamatsu</i> ]

La tabla 4-8 muestra una relación de todos los LED irradiados. Se indican las características que se han considerado relevantes, así como el fabricante. La tecnología de todos los LED irradiados, salvo uno de ellos, es de hetero-unión o doble hetero-unión. Si se observa el que es de unión simple (homo-unión), se ve que es precisamente el que más se degradó. En la tabla también se indica si su tolerancia a la radiación durante estos ensayos fue alta, media, baja o muy baja.

En base a esto, y según tabla 4-8, el LED de la firma *Hamamatsu* modelo L9338 deja de funcionar con una fluencia  $< 5 \cdot 10^{12} \text{ p}^+/\text{cm}^2$  de 50MeV, en concreto  $\sim 2.5 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$  (como se verá más adelante en Fig. 4-6). Este dispositivo ha sido el único catalogado como de tolerancia muy baja. Debido a este comportamiento fue el elegido como sensor de DD para LDT.



Tabla 4-8. LED irradiados durante las campañas de protones entre 2004 y 2006. Se muestra la tolerancia a la radiación encontrada durante estos ensayos (Alta: A; Media: M; Baja: B ; Muy Baja: MB)

LED	Fabricante	Tecnología	Campaña de irradiación (Ver Tabla 4-2)	Número de muestras irradiadas	Tolerancia a DD (Alta - Media - Baja - Muy Baja)	Longitud de onda Pico	Ancho espectral	Potencia óptica Máxima	Seleccionado para su uso en
						nm	nm	mW	
L6108	Hamamatsu	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	1+4	B	670	25	19	LDT [NANOSAT-1B]
L6112	Hamamatsu	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	1+4	B	670	25	19	
L9338	Hamamatsu	Homounión	2 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	4+8	MB	945	60	24	
L3989	Hamamatsu	AlGaAs	2 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	4+8	M	830	40	13	
L7558	Hamamatsu	AlGaAs	2 <sup>a</sup>	4	A	850	50	28	
L9337	Hamamatsu	AlGaAs	2 <sup>a</sup>	4	A	870	45	37	OWLS [NANOSAT-01]
SMT680	Epitex	AlGaAs	5 <sup>a</sup>	4	B	680	20	3	
SMT700	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup>	2	B	700	20	3	
SMT735	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup>	2	B	735	20	10	
SMT760	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	2+4	B	760	35	20	
SMT780	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	2+4	B	780	35	20	
SMT810	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	2+4	B	810	40	20	
SMT820	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	2+4	B	820	40	20	
LED840-04AU	Epitex	AlGaAs	1 <sup>a</sup>	3	B	840	35	40	
SMT830	Epitex	AlGaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup>	2+4	M	830	40	20	
HE7601SG	OpNext (Hitachi)	AlGaAs-DH	1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup>	1+8+16	A	770	50	38	OWLS [MetNet]
HE8812SG	OpNext (Hitachi)	AlGaAs-DH	1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup>	3+8+16	A	870	50	50	
HE8811	OpNext (Hitachi)	AlGaAs-DH	1 <sup>a</sup>	3	A	820	50	40	
TSHG8200	Vishay	AlGaAs-DH	4 <sup>a</sup>	2	B	830	40	50	
TSMG2700	Vishay	AlGaAs-DH	4 <sup>a</sup>	2	B	830	40	40	
ELD-920-535	Roithner Lasertechnik	AlGaAs-DH	1 <sup>a</sup>	3	B	920	65	29	
ELD-950-525	Roithner Lasertechnik	GaAs-DH	1 <sup>a</sup>	3	M	950	50	32	
SFH4650	OSRAM Opto	n.a.	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	2+4+4	M	850	35	40	
SFH4200	OSRAM Opto	GaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	2+4+4	A	950	40	35	
SFH464	OSRAM Opto	n.a.	4 <sup>a</sup>	2	B	660	25	11	
SFH4600	OSRAM Opto	GaAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	2+4+4	A	950	40	35	OWLS [MetNet]
SFH4209	OSRAM Opto.	InGaAsAs	4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup>	2+4+4	A	950	40	40	
OD-830-99-110	Optodiode	AlGaAs	5 <sup>a</sup>	1	-	830	n.a.	3300	
OD-610-99-110	Optodiode	n.a.	5 <sup>a</sup>	1	-	610	n.a.	450	
OD-870-99-110	Optodiode	AlGaAs	5 <sup>a</sup>	1	-	870	n.a.	3300	
CLE330E	Clairex	AlGaAs	4 <sup>a</sup>	2	M	850	60	15	

La Fig. 4-4, la Fig. 4-5 y la Fig. 4-6 muestran las curvas de la degradación de la potencia óptica de los LED en función de la fluencia recibida. En la Fig. 4-4 se muestra el resultado de los LED de *Epitex*, de *Clairex* y de *Roithner Lasertechnik*. En la Fig. 4-5 los de *Osram* y *Vishay*. La Fig. 4-6 muestra los LED de *Hitachi* y *Hamamatsu*.

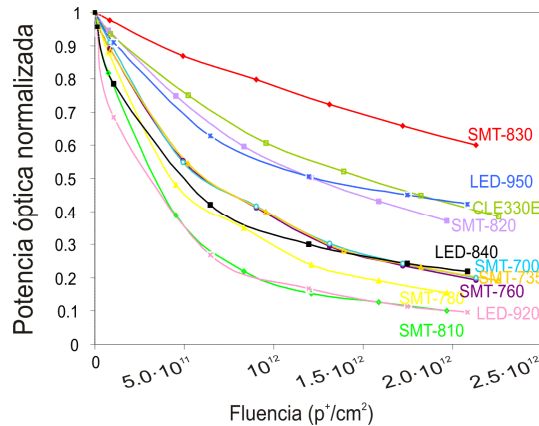


Fig. 4-4. Evolución de la potencia óptica emitida en función de la fluencia recibida por los LED ensayados de las marcas: *Epitex*, *Clairex* y *Roithner Lasertechnik*

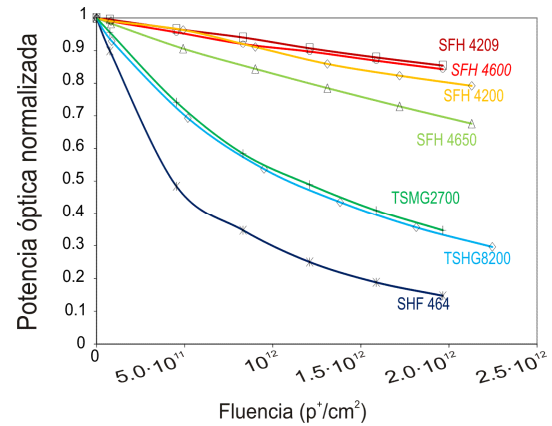


Fig. 4-5. Evolución de la potencia óptica emitida en función de la fluencia recibida por los LED ensayados de las marcas: *Osram* y *Vishay*

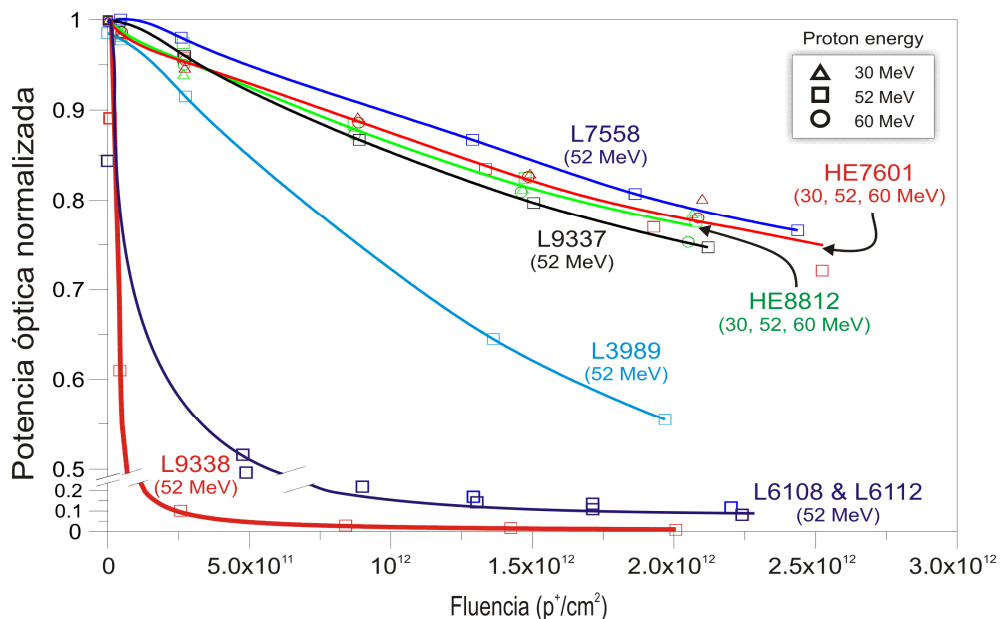


Fig. 4-6. Evolución de la potencia óptica emitida en función de la fluencia recibida por los LED ensayados de las marcas: *Hitachi* y *Hamamatsu*.

### 4.1.3 Irradiación con protones sobre fotodiodos

Durante las seis campañas de irradiación con protones que se realizaron entre finales de 2004 y finales de 2006, se irradiaron 19 tipos de fotodiodos PIN de silicio, de 5 fabricantes diferentes. En total se irradiaron 110 dispositivos (Tabla 4-9). Pese a ser de la misma tecnología, presentan ciertas diferencias en su comportamiento frente a la radiación. Los resultados fueron publicados en [Jim07], [Jim06a] y [Jim04], y a

continuación se muestran los resultados que están en relación con la selección del fotodiodo de LDT.

Tabla 4-9. Fotodiodos irradiados durante las seis irradiaciones

Dispositivo	Fabricante	Área Activa (mm <sup>2</sup> )	Responsividad max. (mA/W)	Corriente de Oscuridad (nA)	Irradiación ID	Nº Muestras irradiadas	Seleccionado para su uso en
S6436	<i>Hamamatsu</i>	38,5	630	5,0	2	3	
S6968		153,9	630	0,5	2	6	
S3399		7,1	600	0,1	1	2	
S6036		38,5	560	0,1	1	1	
S6036-01		38,5	560	0,1	1	1	
S6801		153,9	620	0,5	1	2	
S6801-01		153,9	550	0,5	1	2	
S5106		25,0	720	0,3	1, 2, 3, 4, 5 & 6	4, 9, 18, 2, 9, 2 & 8	LDT <sup>1</sup> [NANOSAT-1B] & OWLS [NANOSAT-01]
C30809	<i>Perkin</i>	50,0	600	0,3	4	2	
C30822	<i>Elmer</i>	20,0	600	0,1	4 & 6	2 & 1	
FFD-200	<i>Optoe.</i>	20,0	600	10,0	4 & 6	2 & 1	
PC10-7	<i>Pacific</i>	10,0	650	1,0	4	2	
PC20-7	<i>Silicon</i>	20,0	650	0,5	4	2	
PC50-7	<i>Sensor</i>	50,0	650	2,0	4	2	
TMD5010	<i>Vishay</i>	7,5	--	2,0	4 & 6	2 & 1	OWLS [MetNet]
TMD5110		7,5	--	2,0	4 & 6	2 & 1	
BPW 34	<i>Osram</i>	7,0	620	2,0	1, 5 & 6	2, 7 & 1	
BPW 34F		7,0	590	2,0	1, 5 & 6	2, 7 & 1	
BPW34S		7,0	590	2,0	6	1	

Nota 1: En realidad el fotodiodo seleccionado para LDT fue el S5107 que pertenece a la misma familia que el S5106.

La corriente de oscuridad de un fotodiodo tiende a variar de manera proporcional a los DD. En la Fig. 4-7 se muestra la evolución de la corriente de oscuridad de once fotodiodos, de cuatro fabricantes distintos. Esta presenta un aumento de hasta 3 órdenes de magnitud, para una fluencia de  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ( $p^+$  de 50 MeV).

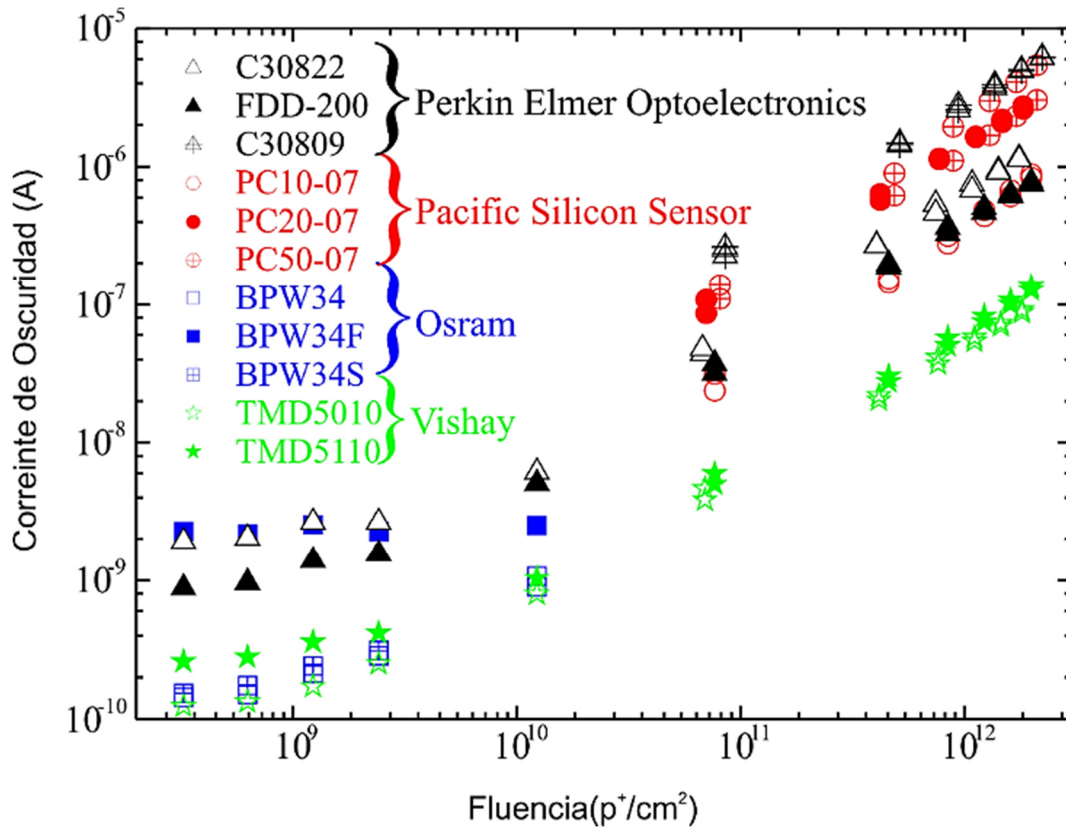


Fig. 4-7. Resumen de los datos obtenidos para algunos componentes irradiados durante las campañas realizadas entre 2004 y 2006 (Tabla 4-2)

La Fig. 4-8 muestra, en tres graficas, los datos de la corriente de oscuridad del S5106 de *Hamamatsu* irradiado bajo diferentes energías (30, 50 y 60 MeV). La línea azul es una referencia para comparar el comportamiento de las muestras representadas en las diferentes gráficas. Dicha línea no corresponde a ajuste alguno, y es exactamente la misma en las tres graficas mostradas. Los datos son de varias irradiaciones en los que los fotodiodos habían estado alimentados a 20 V durante la irradiación, y en otros habían estado simplemente conectados a masa. No se encontró diferencia en su comportamiento. Si bien en esta escala no se aprecian tampoco diferencias con la energía de los protones de irradiación, la TNID (y por ello el efecto sobre la corriente de oscuridad) depende, por su relación con el NIEL, de la energía de los protones (Ecuación 1-14).

La pendiente de estas rectas es el denominado factor de daño [Lar68 y Mes92] de la corriente de oscuridad; sus unidades son  $A \cdot cm^2$  que vienen de  $A/(1/cm^2)$ .

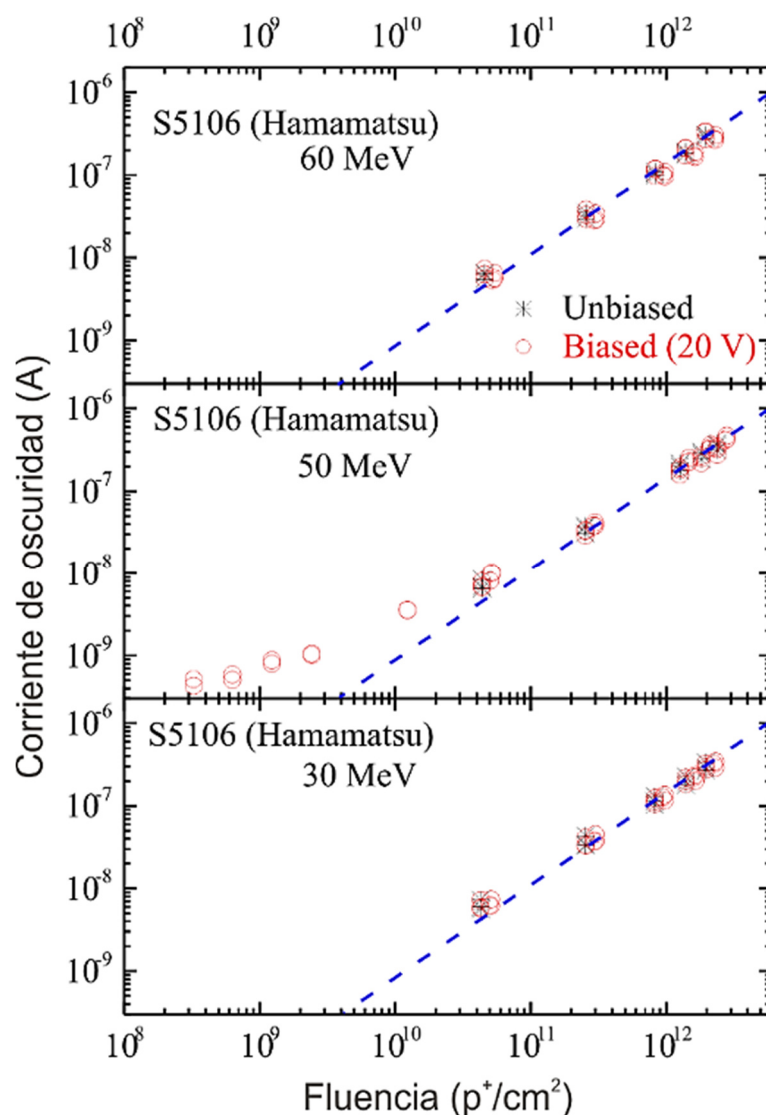


Fig. 4-8. Aumento de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5106 de Hamamatsu. La línea azul es una línea de referencia para facilitar la comparación entre las tres graficas: 60 MeV (arriba), 50 MeV (en medio) y 30 MeV (abajo)

La Fig. 4-9 muestra el factor de daño, de algunos de los fotodiodos irradiados, en función de su área activa. Se observa la dependencia de este factor de daño con el área. Además, se observó que el S5106 de *Hamamatsu* se degradaba menos que el resto de fotodiodos de un área similar. Posteriormente, se comprobó que a los fotodiodo S7510 y S5107 (de la misma familia – mismo fabricante y tecnología) les sucedía lo mismo. El factor de daño de estos fotodiodos se ha representado en un color más claro para indicar que no fueron irradiados hasta la 7ª irradiación de protones (Tabla 4-2), pero sus valores aportan información clave para la selección del fotodiodo y por eso adelantamos estos resultados.

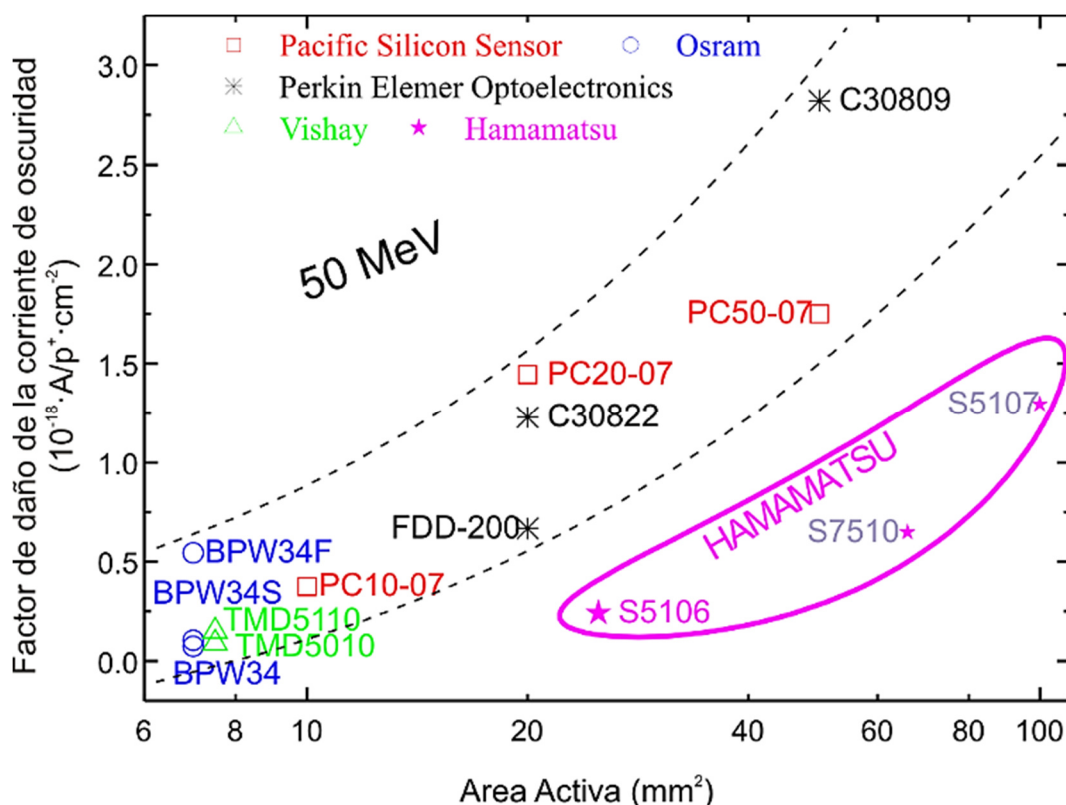


Fig. 4-9. Factor de daño de la corriente de oscuridad de diferentes fotodiodos. Para tener una visión global de la situación se han incluido el S7510 y S5107, de la familia del S5106, que fueron irradiados en campañas posteriores

Todos los factores de daño tienen valores comprendidos entre 0,1 y 3  $A \cdot cm^{-2}$ . Cualquiera de ellos sería adecuado para LDT, pero es evidente que a mayor factor de daño, mayor sensibilidad. Por esta razón, el C30809 podría parecer el mejor candidato. Pero otros factores desaconsejaron su uso.

Los factores a tener en cuenta son de dos tipos diferentes: por un lado las características generales del dispositivo (tamaño, peso, geometría, encapsulado, tipo de ventana, rangos de funcionamiento, datos sobre usos anteriores en espacio); y por otro el factor de daño de su fotosensibilidad o responsividad. Esta característica era importante para el modo de funcionamiento en el que el fotodiodo registra la señal del LED, y la degradación del enlace óptico. En este sentido, una degradación elevada de la fotosensibilidad contribuiría a aumentar la sensibilidad de este modo de medida. Sin embargo, para estudiar la degradación del LED de forma independiente, se decidió elegir un fotodiodo con alta tolerancia a la radiación en términos de su fotosensibilidad.

La degradación que sufre la fotosensibilidad de estos dispositivos se muestra en las Fig. 4-10 y Fig. 4-11. La primera muestra la evolución de los fotodiodos de las marcas

*Pacific Silicon Sensor, Vishay, Osram y Perkin Elmer Optoelectronics*, y la segunda los datos del S5106 de *Hamamatsu*.

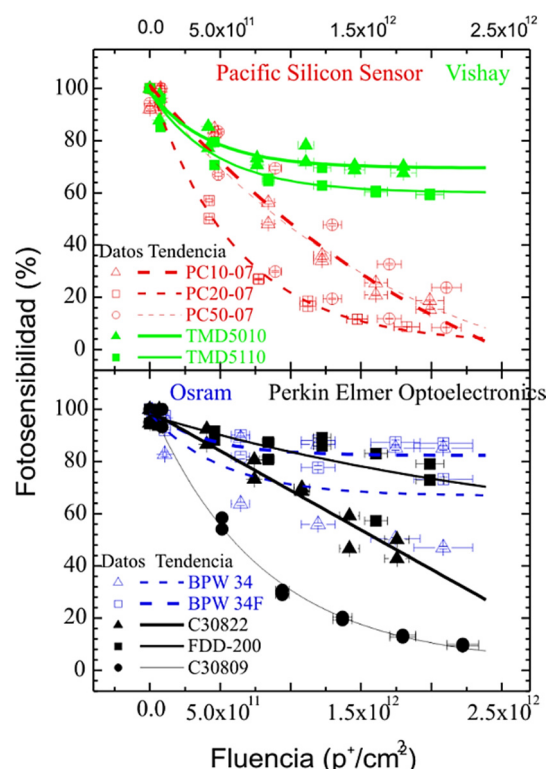


Fig. 4-10. Degradación de la fotosensibilidad de distintos fotodiodos en diferentes condiciones

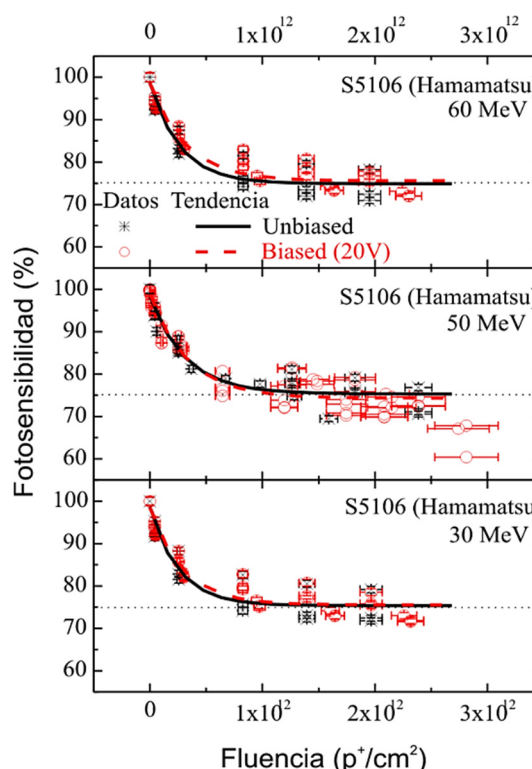


Fig. 4-11. Degradación de la fotosensibilidad del S5106 en diferentes condiciones

El candidato inicial, el C30809, es descartado pues su fotosensibilidad es una de las que más se degrada. Además, su geometría no es la más adecuada para formar un apilamiento en forma de torre, pues su encapsulado metálico, hermético, de 5 mm de espesor, y con los pines de conexión en forma de “patas” por debajo de la carcasa (encapsulado tipo *through hole*) no permitía un diseño compacto de LDT.

Los dispositivos en los que la fotosensibilidad se degradaba menos eran el S5106, el TMD5010 y el TMD5110. Pero el S5106 tiene un factor de daño de la corriente de oscuridad algo mayor que el TMD5010 y que el TMD 5110. Además, el S5106, de 25 mm<sup>2</sup> de área activa, pertenece a una serie de fotodiodos de *Hamamatsu* que cuenta con otros dispositivos idénticos, pero de mayor área: el S7510 (66 mm<sup>2</sup>) y el S5107 (100 mm<sup>2</sup>). Es decir, eligiendo otro fotodiodo de la familia del S5106 con un área mayor, se obtendría un factor de daño más grande. Esto se demostró en la 7ª irradiación en febrero de 2007 durante la caracterización de esta familia de fotodiodos.



El S5107 tiene el mayor factor de daño de los tres y su encapsulado cerámico plano y delegado, y de montaje superficial (en vez de *through hole*), lo hace perfecto para construir apilamientos compactos.

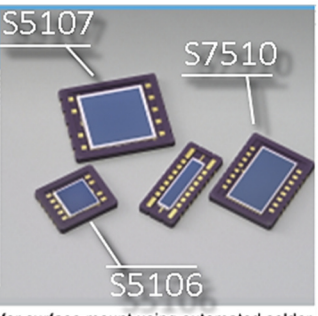
PHOTODIODE

## Si PIN photodiode

# S5106, S5107, S7509, S7510

Chip carrier package for surface mount

S5106, S5107, S7509 and S7510 are Si PIN photodiodes sealed in chip carrier packages suitable for surface mount using automated solder reflow techniques. These photodiodes have large active areas, making them suitable for spatial light transmission where a wide field-of-view angle is required. Other applications include POS scanners, power meters and analytical instruments.




Features

- Active area
- S5106: 5 × 5 mm
- S5107: 10 × 10 mm
- S7509: 2 × 10 mm
- S7510: 6 × 11 mm
- Ceramic chip carrier package for surface mount

Applications

- Spatial light transmission
- Laser radar
- Power meter
- Bar-code reader



HAMAMATSU

Fig. 4-12. Familia del S5107 de Hamamatsu

## 4.2 NIEL de la familia del S5107

La séptima irradiación de  $p^+$  (Tabla 4-12) tuvo como objetivo caracterizar los DD en función de la energía, es decir, obtener una expresión proporcional al NIEL y compararla con datos de la literatura, para asegurar que las caracterizaciones se estaban realizando correctamente. Con este ensayo se pretendía también confirmar que la elección del fotodiodo S5107, el de mayor área de la familia, era la adecuada para LDT. Fue una irradiación activa (detalles de su ejecución se han mostrado en el §3.3.3). Por tratarse de un ensayo mezcla de caracterización y selección, no se ha englobado dentro del apartado anterior (el de *selección*), ni en el siguiente (el de *caracterización*).

Para determinar el factor de daño de los fotodiodos de la familia del S5107, se emplearon las ocho energías mostradas en la tabla 4-10, en la que también se indica la fluencia total de cada paso de irradiación:



Tabla 4-10. Datos de los pasos de irradiación durante la caracterización de la dependencia del factor de daño del S5107 con la energía. El flujo en todos los casos fue de  $1,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Id. de energía	Energía [MeV]	Paso de irradiación	Fluencia $10^8 \times [\text{cm}^{-2}]$
E <sub>1</sub>	10,76	1	5
		2	1
E <sub>2</sub>	14,59	3	5
		4	1
E <sub>3</sub>	20,63	5	5
		6	1
E <sub>4</sub>	25,34	7	5
		8	1
E <sub>5</sub>	30,29	9	5
		10	1
E <sub>6</sub>	39,92	11	5
		12	5
E <sub>7</sub>	49,85	13	1
		14	5
E <sub>8</sub>	62,51	15	1
		16	5

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4-13 [Jim07]. Puede verse que el factor de daño de la corriente de oscuridad aumenta con el área<sup>7</sup> del fotodiodo. Así pues, de los tres candidatos probados, el S5107 es el que tiene un factor de daño de corriente de oscuridad

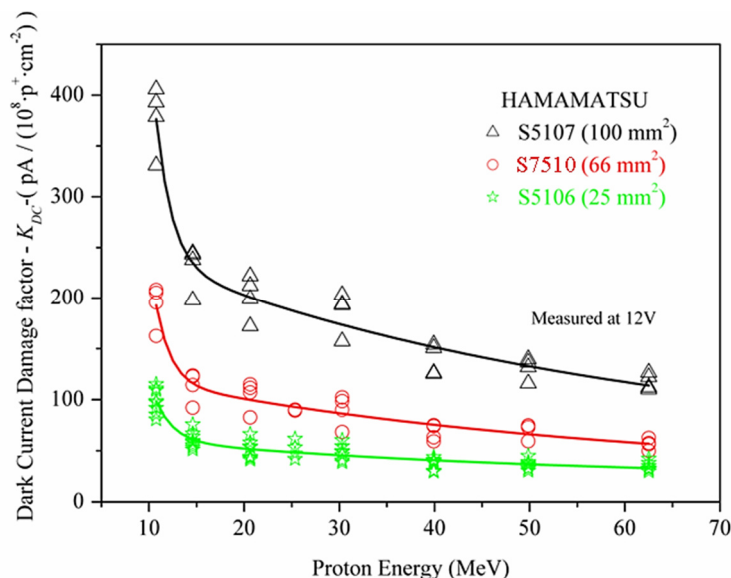


Fig. 4-13. Factor de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos S5107, S7510 y S5106 [Jim07].

mayor, y con ello queda corroborado que dicho fotodiodo es el más sensible a los DD.

Para validar el procedimiento de medida y análisis, se han comparado estas curvas con el NIEL de protones en silicio de diversos autores. Para realizar esta comparación ha sido necesario trabajar normalizando las curvas de este trabajo, y las de la literatura, a un valor común. Pues por la hipótesis de linealidad entre daño y NIEL se asume que estas magnitudes son proporcionales [Vas00a]. El valor elegido para la

<sup>7</sup> En realidad la dependencia es con el volumen total de la “zona de agotamiento de carga” (depletion zone) de la unión p-i-n o p-n. Este volumen es proporcional al área del dispositivo.

normalización ha sido el daño sufrido a 49,85 MeV (~50 MeV), que es un valor recurrente en las irradiaciones con protones y el que se ha usado, de forma habitual, en la mayoría de los ensayos realizados en esta tesis. La Fig. 4-14 muestra este NIEL normalizado de los tres fotodiodos. Las curvas mostradas en la Fig. 4-14 deberían de corresponder con el NIEL normalizado de protones en silicio, y ser iguales entre ellas. Se comprueba que todas ellas difieren entre si menos de un 10%. Esta diferencia es debida a la no uniformidad espacial del haz (que si bien está corregida, siempre introduce incertidumbre) y el ruido de las medidas.

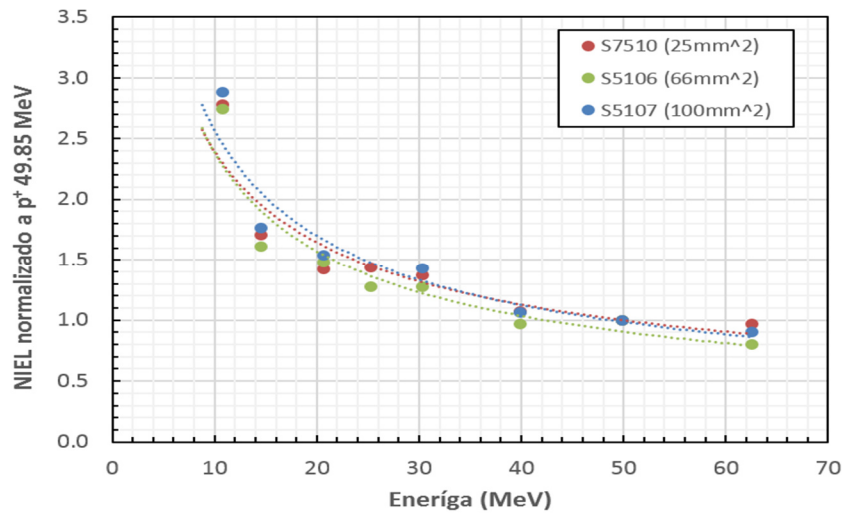


Fig. 4-14. NIEL normalizado a  $p^+$  de 49,85 MeV de los tres fotodiodos irradiados: S5106, S5107 y S7510. Los datos son ajustados a una ecuación tipo potencial como la mostrada en [4-1]

En la Fig. 4-15 se comparan los datos del NIEL normalizado a 49,85 MeV del fotodiodo S5107 con el NIEL obtenido por Summers [Sum93] y Huhtinen [Hut93] recogidos en [Vas00]. Los datos de estos autores se han normalizado también a protones de 49,85 MeV para su comparación. Se ha comprobado que estas curvas, aquí mostradas, se ajustan a una ecuación potencial<sup>8</sup> del tipo:

$$y = a \cdot x^b \quad 4-1$$

La comparación con los datos de Summers y Huhtinen indica que hay coincidencia. El único dato que no se ajusta es el medido a 11,76 MeV. Esta discrepancia puede justificarse porque el haz usado no es mono-energético. Cuanto menor es la energía del haz, más ancho es su espectro. Esto se produce por el uso de degradadores para reducir la energía del haz principal (§3.2.2). En particular, en las condiciones de este ensayo, el

<sup>8</sup> Este comportamiento potencial no es extensible a todo el rango energético del espectro de protones, pero funciona muy bien entre 10 y 100 MeV.

haz de 11,76 MeV utilizado tenía una anchura a media altura de ~5,3 MeV. Los protones de menor energía producen mayor daño que los de altas energías. La relación entre la energía y el daño no es lineal, por lo que pesan más, en la contribución del daño, los protones de menor energía que los de mayor. Esto se traduce en que el daño en este punto aumenta por encima de lo esperado, pues está siendo irradiado con protones de energías inferiores a 11,76 MeV.

Tras eliminar este punto y realizar el ajuste potencial al resto de los datos, se obtiene un resultado prácticamente idéntico a los de Summers y Huhtinen en este rango de energías (Fig. 4-15).

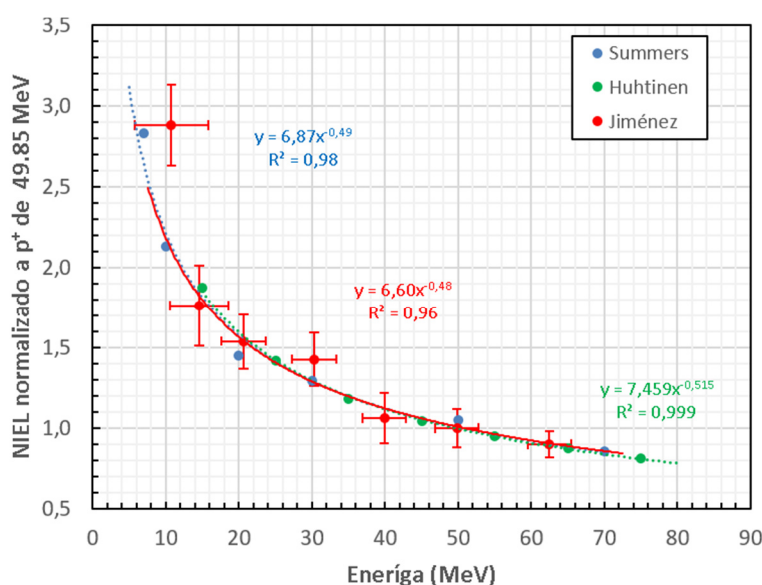


Fig. 4-15. NIEL normalizado a  $p^+$  de 49,85 MeV para el fotodiodo S5107 empleado en LDT. Se presentan los datos proporcionados por [Vas00] para los resultados de Summers [Sum93] y Huhtinen [Huh93] para silicio

Los parámetros de los tres ajustes se muestran en la Tabla 4-11, en la que se comprueba que teniendo en cuenta los intervalos de incertidumbre, el acuerdo entre los datos es notable.

Tabla 4-11. Datos del ajuste potencia (“ $y=a \cdot x^b$ ”) del NIEL normalizado a protones de 49,85 MeV de los datos del fotodiodo S5107 de LDT y de datos para silicio de Summers [Sum93] y de Huhtinen [Huh93] proporcionados por [Vas00] (válidos entre 12 MeV y 65 MeV)

Parámetro	Summers		Huhtinen		S5107	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
a	7,555	0,77 (10%)	7,647	0,18 (2%)	6,19	1,0 (16%)
b	-0,5253	0,039 (7%)	-0,52174	0,0069 (1%)	-0,4611	0,05 (11%)
$r^2$	0,98	--	0,9991	--	0,95	--

### 4.3 Caracterización de los detectores de LDT

La caracterización de los detectores de LDT se realizó durante la irradiación  $8^a$  p<sup>+</sup>. En la tabla 4-12 se muestran los datos generales de esta campaña de irradiación:

Tabla 4-12 Irradiaciones de caracterización de los transductores LDT

Id. irradiación	Fecha	Instalación	Energías [MeV]	Fluencia [cm <sup>-2</sup> ]	Flujo [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Componentes irradiados
#8p <sup>+</sup>	27-6-08	PIF-PSI [Suiza]	50,41	Entre 10 <sup>7</sup> y 10 <sup>10</sup>	Entre 10 <sup>4</sup> y 10 <sup>8</sup>	Los elementos sensibles de LDT [L9338 y S5107]

Durante los ensayos de selección ya se habían caracterizado los parámetros que iban a ser usados para medir los DD producidos por el entorno de radiación. Pero el flujo y la fluencia, al que habían sido sometidos, eran muy superiores a los esperados en órbita. Simulaciones del entorno de radiación<sup>9</sup> muestran flujos medios de  $\sim 7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , con picos inferiores a  $10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en el centro de la AAS (frente a los  $10^7 - 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  usados en los ensayos de radiación). Estas mismas simulaciones predicen que la fluencia acumulada durante un año es  $< 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  (frente a los  $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  acumulados durante los ensayos de selección de dispositivos). Existen diferencias, de entre 4 y 7 órdenes de magnitud, que podrían originar que las calibraciones en tierra no fueran aplicables a las condiciones de vuelo.

Se sabe que los efectos sobre los dispositivos pueden depender del flujo de irradiación (en este caso por efectos de *annealing*, pues esta tecnología no es sensible a ELDRS), y que pueden no ser lineales con la fluencia. Este es el motivo por el que esta caracterización se centró en evaluar el comportamiento de los detectores a una fluencia y un flujo “más cercano” al entorno en órbita (si bien, aun “muy lejos” del valor real). Para solucionarlo, la estrategia seguida fue la de estudiar la dependencia del factor de daño, de estos elementos sensibles (los fotodiodos y los LED), con el flujo y la fluencia de protones, para tratar de inferir la que podría tener en las condiciones de vuelo. Fue una irradiación pasiva de protones (§3.3.2).

En este ensayo se pretendían dos cosas: por un lado realizar un barrido del flujo (entre  $10^4$  y  $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) tratando de mantener fija la fluencia, y por el otro, irradiar desde fluencias de  $10^7 \text{ cm}^{-2}$  hasta  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  con el mismo flujo. En la práctica, se requerirían

<sup>9</sup> Estas simulaciones se muestran en el capítulo de resultados y están expresadas en protones equivalentes de 10 MeV.

tiempos de ejecución muy grandes. Pues suponiendo un flujo constante se puede aplicar la ecuación 1-4 ( $\Phi = \phi \cdot \Delta t$ ).

Esto implica que si se quiere dejar la fluencia ( $\Phi$ ) constante, y ejecutar dos pasos de irradiación con dos flujos de valores muy diferentes ( $\phi_1 = 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y  $\phi_2 = 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), para comparar el efecto, el tiempo de cada uno de los pasos ( $\Delta t$ ) debe de ser también muy distinto. En el caso de este ejemplo:

$$\text{Si } \Delta t_2 = 2 \text{ segundos} \rightarrow \Delta t_1 = 5,6 \text{ horas} \quad 4-2$$

Las implicaciones en el tiempo total de ejecución, y en el coste final, condicionaron a que se siguiera un plan como el mostrado en la Tabla 4-13. En su ejecución se usaron seis tarjetas de irradiación idénticas, cada una de ellas fue irradiada en condiciones diferentes, para comparar los resultados entre ellas.

Tabla 4-13. Pasos de irradiación durante la determinación de la influencia del flujo en el daño. Irradiación realizada con protones de 50,41MeV

Id. tarjeta	Nº de repeticiones	Fluencia [p <sup>+</sup> /cm <sup>2</sup> ]	Flujo [p <sup>+</sup> /cm <sup>2</sup> .s]	Duración [s]	Objetivo
OPTO1	5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>4</sup>	1000	Barrer el flujo. Fluencia cte.
OPTO2	5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>5</sup>	100	
OPTO3	5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10	
OPTO4	5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	1	
OPTO5	5	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10	
OPTO6	3	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10	
	2	10 <sup>10</sup>	10 <sup>8</sup>	100	Barrer fluencia. Flujo cte.

Es importante reseñar que los valores de fluencia y flujo mostrados aquí fueron, en la práctica, ligeramente diferentes. La tabla con los valores conseguidos se mostró en §3.3.2.2 (Tabla 3-2).

También se incluyen en este apartado la modelización del *annealing*. Se ha llegado a obtener una expresión experimental dependiente del tiempo, que ha sido crucial para estimar el verdadero factor de daño a los flujos orbitales. Se verá que está acorde con la literatura, y que incluso mejoran el intervalo temporal de aplicación.

Durante esta campaña se irradió también el sensor de temperatura que sería usado en LDT (TMP-36). Se hizo en las mismas condiciones de montaje (pegado directamente

en la parte trasera de cada uno de los fotodiodos) para verificar su comportamiento real. También se aprovechó para irradiar otros componentes electrónicos de la cadena de procesado y acondicionado de la señal.

Esta sección se va dividir en dos partes, una para presentar de los resultados obtenidos con los fotodiodos, y una segunda para los de los LED.

### 4.3.1 Fotodiodos

Se mostrará la dependencia del factor de daño de la corriente de oscuridad ( $K_{\Phi}$  o  $K_{osc}$  o  $K_{DD}$ ) del fotodiodo S5107 con el flujo y la fluencia de protones. Se conoce la respuesta a fluencias muy altas [Lin09] y [Huh96], y medias [Jim07], [Jim06a] y [Jim04], ahora se trata de verificar el factor de daño en las condiciones de flujo y fluencia mucho más bajas de una órbita LEO. También se describe el efecto del *annealing* sobre dicho factor de daño, y su implicación frente a irradiaciones a “muy bajo” flujo (el caso real en órbita), calculando un factor de corrección para el factor de daño ( $K_{annealing}$ ). Después se muestra la dependencia con el voltaje de polarización de medida, y con el voltaje de polarización de irradiación, lo cual tendrá ciertas implicaciones en el diseño del instrumento. Por último, se caracteriza el efecto transitorio que produce la ionización en la señal del fotodiodo, que se llamará sensibilidad al flujo de protones, o sensibilidad a la ionización ( $K_{\phi}$  o  $K_{Ion}$ ).

#### 4.3.1.1 Dependencia del factor de daño con la fluencia y el flujo

En la Fig. 4-16 se muestra la corriente de oscuridad de los fotodiodos de las seis tarjetas de irradiación de este ensayo, en función de la fluencia. Estos datos se ajustan a una recta de pendiente  $2,33 \cdot 10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$ . Nótese la bondad del ajuste, lo cual es una primera indicación de que el comportamiento de los S5107 es el mismo bajo diferentes flujos. Además, como ajustan a una recta, queda demostrado que el factor de daño (que es la pendiente de la recta) es el mismo en todo el rango de fluencias del ensayo. Los coeficientes del ajuste se muestran en la Tabla 4-14, junto con sus errores estadísticos.

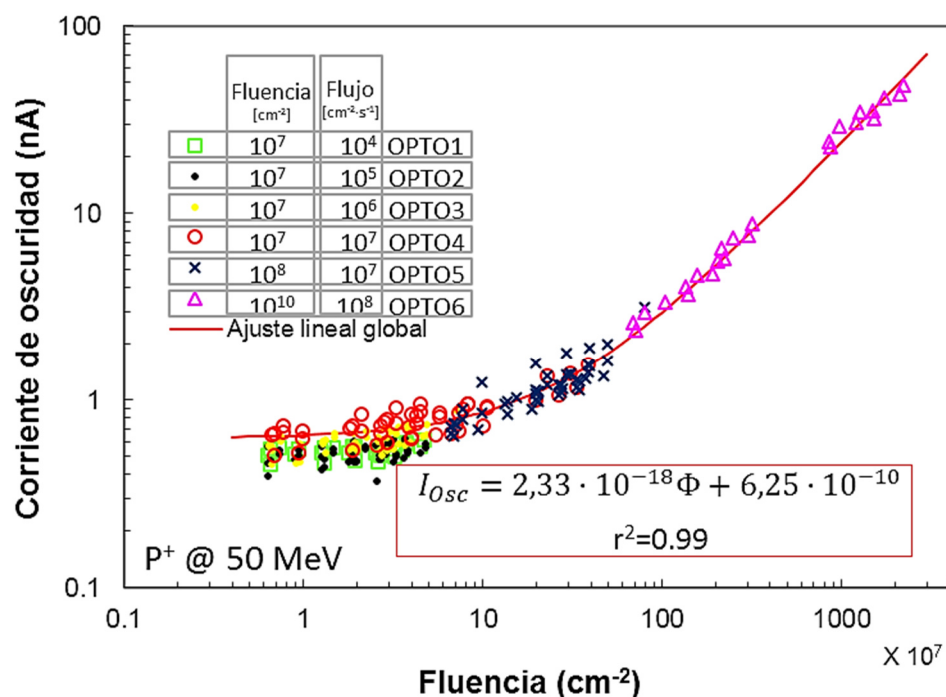


Fig. 4-16. Corriente de oscuridad en función de la fluencia acumulada de protones de 50,41 MeV

Tabla 4-14. Ajuste lineal ( $y=m \cdot x+b$ ) de la corriente de oscuridad con la fluencia acumulada del S5107 con un  $r^2=0,99$ . Donde “ $m$ ” es el factor de daño de la corriente de oscuridad

Parámetro de ajuste	Valor	Incertidumbre	Incertidumbre [%]
<b>Factor de Daño</b> [A/ cm <sup>2</sup> ]	$2,3328 \cdot 10^{-18}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$	0,7
<b>b</b> [cm <sup>2</sup> ]	$6,248 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-11}$	8,8

Para profundizar en el análisis, se ha ajustado a una línea recta los datos de cada una de las seis tarjetas. Algunos de estos ajustes, junto con los datos experimentales, se han representado en diferentes gráficas para ilustrar su comportamiento. En la Fig. 4-17 (izquierda) se presenta los datos de OPTO4 y OPTO5, irradiadas al mismo flujo pero acumulando fluencias diferentes. Se aprecia una ligera diferencia, la cual se explica por el ruido y dispersión de los datos. En la Fig. 4-17 (derecha) se representan los ajustes de los datos de OPTO1 (irradiada al flujo más bajo), OPTO4 (irradiada a un flujo más alto y hasta la misma fluencia) y OPTO6 (la tarjeta a la que se le habían aplicado los niveles más altos de irradiación). Las diferencias son evidentes, pero están también dentro del intervalo de dispersión.

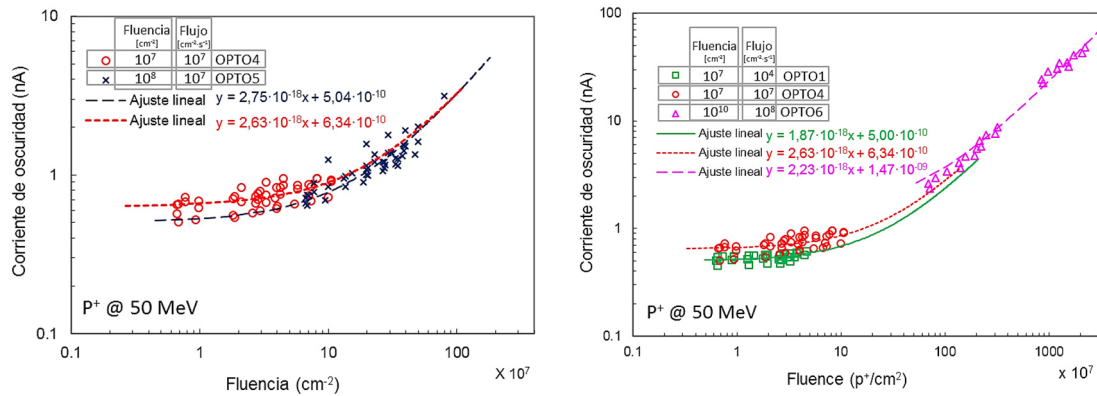


Fig. 4-17. Corriente de oscuridad del S5107 en función de la fluencia acumulada con dos flujos diferentes. Se representan su ajuste lineal. La pendiente de dicho ajuste es el factor de daño

Con los factores de daño de la corriente de oscuridad ( $K_{osc}$ ) obtenidos de los ajustes de cada una de las seis tarjetas, se ha construido la Fig. 4-18. En ella se representa el factor de daño en función del flujo medio de irradiación al que se vieron sometidas las tarjetas. Cada punto ha sido representado con un color y símbolo diferente, para distinguir la fluencia total acumulada en los 5 pasos de irradiación.

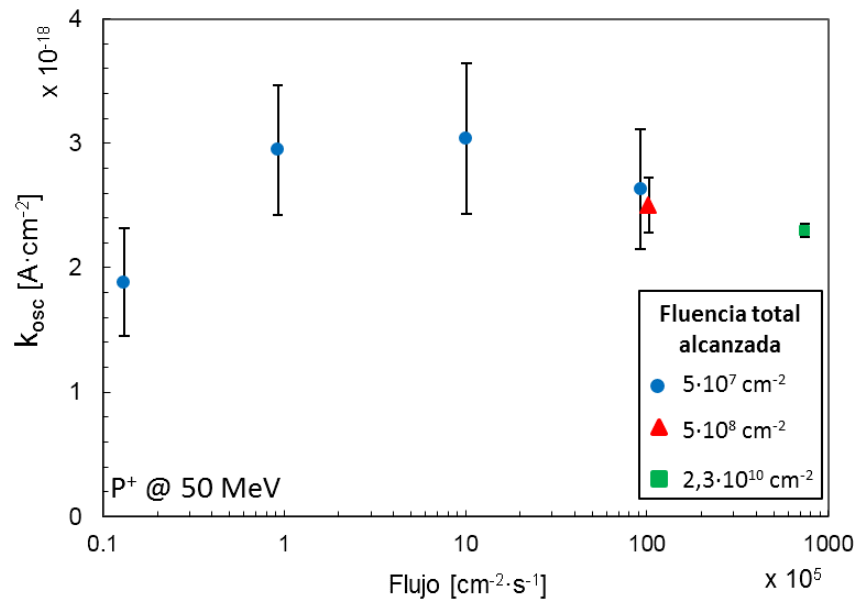


Fig. 4-18. Factor de Daño de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5107 de LDT en función de flujo de irradiación

Los resultados no muestran de manera concluyente una dependencia del daño de la corriente de oscuridad ( $K_{osc}$ ) con el flujo de irradiación, por lo que se consideran independientes, al menos en el rango de flujos del ensayo (entre 10<sup>4</sup> y 10<sup>8</sup> cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>). Es un buen primer paso, pero para estimarlo a flujos “muy bajos”, se tendrá que hacer modelizando el *annealing*.



### 4.3.1.2 Modelización del “annealing”

Una forma de estimar el factor de daño a flujos “muy bajos” es caracterizando su *annealing*. Si esta recuperación es “muy grande”, el factor de daño real será “más pequeño” que si no sufriera *annealing*.

Durante las irradiaciones de selección de componentes, se hicieron algunas comprobaciones en este sentido. Una de las conclusiones halladas fue que la recuperación no depende del dispositivo, ni del fabricante, lo cual está en consonancia con M. Moll [Mol99] [Mol02].

La Fig. 4-19 muestra el porcentaje de recuperación de la señal de la corriente de oscuridad de varios de los fotodiodos irradiados, y entre ellos el S5106, el cual se asume que tendrá un comportamiento igual que el S5107.

Tradicionalmente [Wun92], se consideraba que la recuperación tenía una evolución con un valor de saturación que se alcanzaba, a temperatura ambiente, transcurrido un año. Sin embargo, estudios posteriores, llevados a cabo por M. Moll, muestran que no parece haberla. Del modelo que este describe, se puede obtener que la corriente de oscuridad de un fotodiodo en función del tiempo, después de haber sido irradiado, viene dada por la expresión:

$$I(t) = \frac{K_i}{K_{Moll}(t)} \cdot \left( \alpha_0 \cdot e^{(-t/\tau_1)} + \alpha_1 - \alpha_2 \cdot \ln(-t/\tau_2) \right) \cdot V \cdot \Phi_{eq.} + I_{pre-irradiacion} \quad 4-3$$

en donde  $\Phi_{eq.}$  es la fluencia equivalente a la que se ha visto sometido;  $V$  es el volumen de la zona de agotamiento de carga de la unión p-n (o p-i-n, en este caso); los parámetros

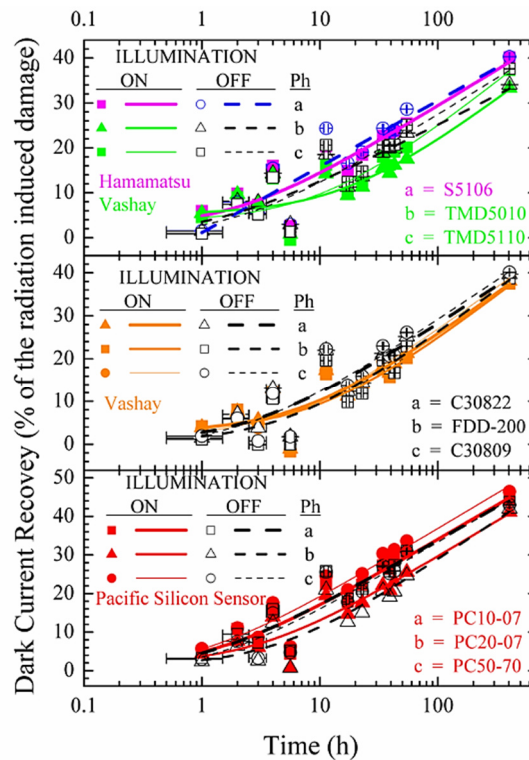


Fig. 4-19. Recuperación de la corriente de oscuridad. En condiciones de iluminación y en condiciones de oscuridad [Jim07]

$\alpha_i$  y  $\tau_i$  los obtiene Moll experimentalmente y se muestran en la Tabla 4-15;  $\tau_2$  lo fija a 1 minuto; y  $K(t)$  se considera el factor de daño después del transcurso de un determinado tiempo ( $t$ ).

Tabla 4-15 Parámetros obtenidos por M. Moll [Mol02] con  $\tau_2=1$  min, a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	$\alpha_0$ $10^{-17} \times [\text{A/cm}]$	$\tau_i$	$\alpha_i$ $10^{-17} \times [\text{A/cm}]$	$\alpha_2$ $10^{-18} \times [\text{A/cm}]$
21	1,23	$1,4 \cdot 10^4$	7,07	3,29
49	1,28	260	5,36	3,11
60	1,26	94	4,87	3,16
80	1,13	9	4,23	2,83
106	-	-	3,38	2,97

Para poder comparar los resultados obtenidos en la tesis con los de Moll, se ha usado la expresión 4-3 con los parámetros de la tabla 4-15 a 21°C. Se ha calculado el porcentaje de recuperación que se obtendría, y se han representado junto con los datos del fotodiodo S5106 (Fig. 4-20). El propio Moll expone que no sabe si su

modelo es extrapolable a temperaturas distintas de las mostradas, ni para un tiempo superior a 1 año, por ese motivo la prolongación de su modelo se hace con una línea punteada.

Los datos del porcentaje de recuperación del S5106 han sido ajustados a una función logarítmica (también representada en la Fig. 4-20) cuyos parámetros se muestran en la Tabla 4-16.

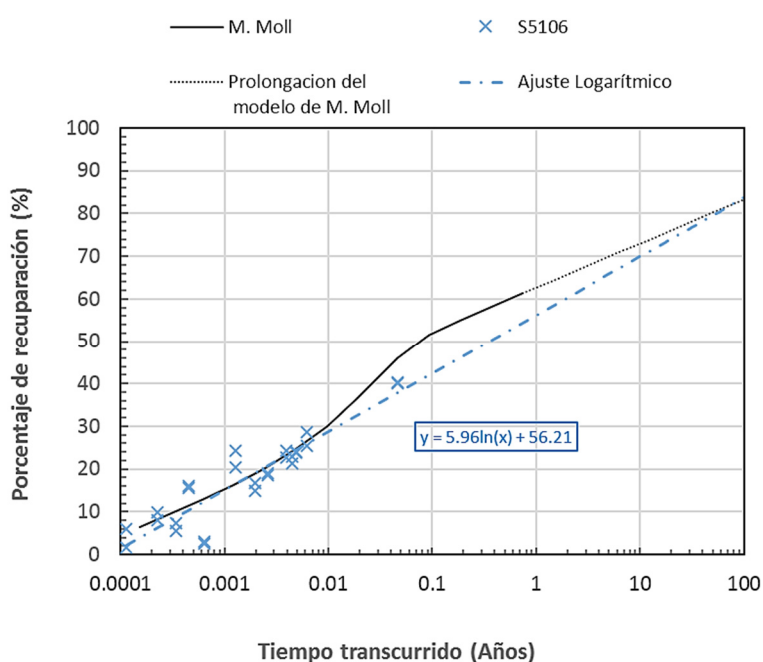


Fig. 4-20. Porcentaje de recuperación de la corriente de oscuridad del S5106 con su ajuste logarítmico y el modelo de M.Moll ( $T = 25^\circ\text{C}$ )

Tabla 4-16. Ajuste logarítmico ( $y=a \cdot \ln(x)+b$ ) del porcentaje de recuperación de la corriente de oscuridad en función del tiempo expresado en años. Se obtiene un  $r^2=0,99$ . Donde “ $b$ ” es el porcentaje de recuperación transcurrido 1 año

Parámetro de ajuste	Valor	Error	Error (%)
$a$	5,96	0,52	8,7
$b$			
[% de recuperación transcurrido un año]	56,2	3,4	6,0

El modelo de obtenido por Moll y el de la tesis dan valores similares. Para aplicar esta recuperación a un caso real, es más conveniente usar el porcentaje de cambio de la corriente, expresado en tanto por uno:

$$K_{annealing}(t) = \frac{100 - \%_{Recuperacion}}{100} \quad 4-4$$

Se obtiene que:

$$K_{annealing}(t) = -0,0596 \cdot \ln(t) + 0,438 \quad 4-5$$

en donde  $K_{annealing}$  indica el factor de corriente ( $\Delta I_{DD}$ ) que queda aún por recuperar para alcanzar el valor inicial. Si  $K_{annealing} = 0$  indica que la corriente se ha recuperado hasta el estado inicial de antes de la irradiación. Por tanto

$$\Delta I(t) = I_{post-annealing}(t) - I_{pre-irradiacion} = K_{annealing}(t) \cdot \underbrace{\Delta I}_{\text{Efecto de los DD}} \quad 4-6$$

Por lo que también se puede escribir:

$$\Delta I(t) = \underbrace{K_{annealing}(t) \cdot K_{DD}}_{\substack{\Downarrow \\ K_{Moll}(t)}} \cdot \overbrace{\Delta I} \cdot \Phi_{eq}. \quad 4-7$$

Esta función, con los parámetros obtenidos con el S5106, es extrapolable al S5107 de LDT, pues además de ser un dispositivo de la misma familia, el propio Moll concluye en [Mol02], que incluso fotodiodos con diferentes tipos de dopajes e impurezas, presentan el mismo ritmo de recuperación.

#### 4.3.1.3 Dependencia del factor de daño con la polarización de medida

Primeramente se va a definir que son el voltaje de polarización de irradiación y de voltaje de polarización de medida:

- El voltaje de polarización de irradiación es el que se aplica durante el periodo en el que se está irradiando la muestra.
- El voltaje de polarización de medida es el que se aplica al fotodiodo para medir su corriente de oscuridad.

El montaje que se desarrolló para la irradiación de caracterización (la irradiación #8p<sup>+</sup>) no permitía modificar la polarización de irradiación, ni la de medida. Por este motivo se presentan en este apartado el factor de daño obtenido en la irradiación #3p<sup>+</sup> del fotodiodo S5106. Esta irradiación se realizó sobre algunas muestras irradiadas sin polarizar, y otras irradiadas mientras estaban polarizadas a 20 V. No se encontraron diferencias apreciables entre ambos grupos de fotodiodos [Jim07], [Jim06] y [Jim05].

Sin embargo, el factor de daño sí depende del voltaje de polarización de medida, y decrece al llevar a cero dicha polarización. Esta tendencia se aprecia en la Fig. 4-21 en la que se representan los datos de las muestras irradiadas a 20 V y las irradiadas sin polarizar. También se aprecia que efectivamente no hay diferencias importantes entre ambos grupos.

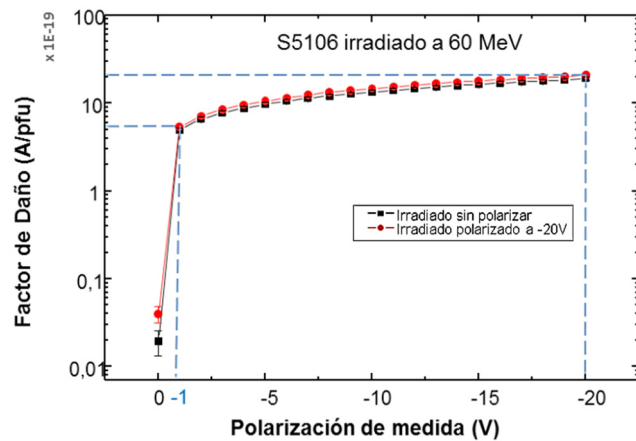


Fig. 4-21. Factor de Daño de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5106 en función de la polarización de medida. Se comparan los resultados de unidades irradiadas polarizadas (rojo) con otras sin polarizar (negro)

Seguidamente se va a obtener una expresión general de la relación entre el voltaje de polarización de medida y el factor de daño. Se demostrará que los resultados obtenidos con el S5106 son también aplicables al S5107.

En un instante  $t_i$ , el factor de daño depende del volumen de la zona de agotamiento de carga de la unión (según se vio en la ecuación 4-3), y por tanto se puede escribir que:

$$K_{Moll}(t_i) = K_i \cdot Volumen \quad 4-8$$

El volumen del fotodiodo depende del área del dispositivo  $A$  y del espesor de la zona de agotamiento de carga  $W$ . El espesor depende de varios factores del

semiconductor, además del voltaje de la unión p-n. Bajo la suposición de una unión p-n abrupta, el espesor puede escribirse como:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot (V_{int} + V_{Ext})} \quad 4-9$$

en donde:

- $\varepsilon$  es la permisividad eléctrica del silicio del fotodiodo.
- $V_{int}$  es el voltaje interno de la unión sin polarizar.
- $V_{Ext}$  es el voltaje inverso aplicado externamente.
- $N_A$  y  $N_D$  dependen del nivel de dopado del silicio.

Suponiendo que el fotodiodo tiene un área  $A$  y combinando 4-8 y 4-9 se obtiene que el factor de daño se puede expresar como:

$$K(V_{Ext}) = K_i \cdot A \cdot L \cdot \sqrt{V_{int} + V_{Ext}} \quad 4-10$$

Según las expresiones anteriores, el factor de daño de dos fotodiodos dopados de igual forma, se comportan igual. Por ello, los datos obtenidos con el S5106 son aplicables al S5107 sin más que tener en cuenta la diferencia de área entre ellos.

Ahora se va a mostrar que la ecuación anterior se ajusta a los datos experimentales obtenidos con el S5106, y que, por tanto, la aproximación de unión p-n abrupta funciona bien, y que igualmente será aplicable al S5107. En la Fig. 4-22 se muestran los datos de los factores de daño (normalizados a 12 V de polarización inversa) del fotodiodo S5106 en función del  $V_{Ext}$ . Son datos correspondientes a las irradiaciones #2p<sup>+</sup>, #3p<sup>+</sup> y #4p<sup>+</sup>. Se ha marcado con \* los que ya se habían mostrado en la Fig. 4-21. El ajuste se realiza sobre la ecuación 4-10 también normalizada a 12 V y suponiendo que el  $V_{int} = 0,59$  V (dato medido experimentalmente a 23°C). Resulta una expresión:

$$\frac{K(V_{Ext})}{K(12\text{ V})} = M \cdot \sqrt{V_{int} + V_{Ext}} \quad 4-11$$

Con el ajuste se obtendrá el parámetro  $M$ , el cual se considerará aplicable al S5107.

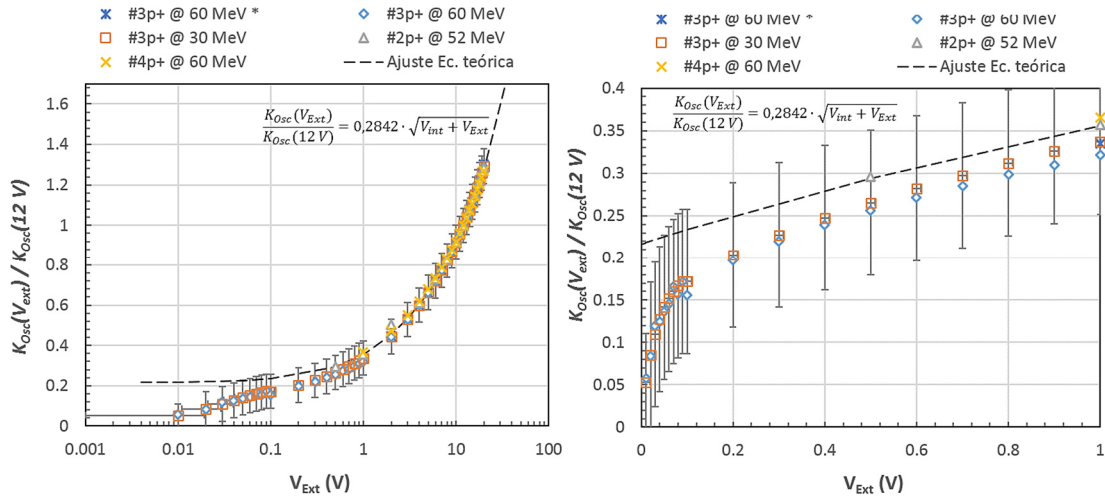


Fig. 4-22. Factor de daño de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5107 de LDT en función de flujo de irradiación. A la izquierda con el eje de la polarización en escala logarítmica, a la derecha una ampliación en escala lineal de los voltajes comprendidos entre 0 y 1 V

La expresión teórica describe de manera óptima la situación con polarizaciones de medida superiores a 1 V. Así pues, se asume que el S5107 tiene un comportamiento similar. Por debajo de 0,1 V los datos experimentales se separan de la tendencia de la ecuación teórica y decrecen drásticamente.

Por ello se concluye que el voltaje de polarización de medida debe ser lo más alto posible para aumentar la sensibilidad y mejorar la relación señal/ruido; nunca ha de ser inferior a 0,1 V.

#### 4.3.1.4 Respuesta al flujo

Durante la irradiación #7p<sup>+</sup> se ha podido observar que irradiando con protones de 50 MeV la corriente de ionización es lineal con el flujo, al menos hasta  $1,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La pendiente de esta recta es lo que se ha llamado *sensibilidad del fotodiodo a la ionización* ( $K_\phi$  o  $K_{Ion}$ ). En la Fig. 4-23 se muestran los datos experimentales y la recta del ajuste lineal. La pendiente de esta recta es la sensibilidad. Se ha hallado, en este caso, que es del orden de  $8 \cdot 10^{-14} \text{ A/cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Las

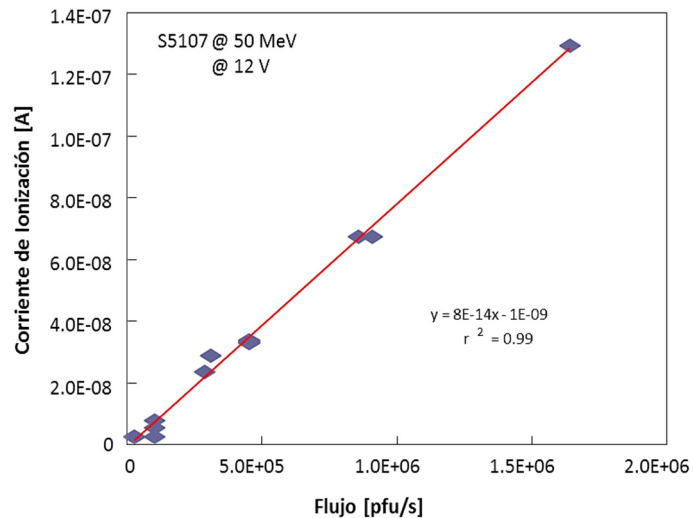


Fig. 4-23. Corriente de ionización generada en los fotodiodos S5107 en función de flujo de protones de 50 MeV

medidas a flujos bajos son altamente ruidosas, por eso, para aplicarlo a flujos bajos, se considera tan solo una estimación del orden de magnitud ( $\sim 50\%$  de error).

### 4.3.2 LED

Al igual que en el apartado anterior se mostraban los resultados de la caracterización del factor de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos, aquí se muestran los relacionados con el factor de daño de la potencia de emisión del LED ( $K_{LED}$  o  $K_{DD}$ ). Se estudiarán los efectos del flujo de irradiación, la fluencia total acumulada, y los factores que influyen en el *annealing*, para minimizarlo y así evitar introducir factores de corrección.

#### 4.3.2.1 Dependencia del factor de daño con la fluencia y el flujo

El factor de daño de la potencia óptica de emisión de los S9338 no es constante con la fluencia. La Fig. 4-24 muestra la potencia normalizada de emisión de los LED irradiados en función de la fluencia acumulada. La curva de decaimiento exponencial que mejor se ajusta a los datos, también se muestra en esta gráfica, y deja de manifiesto la dependencia del factor de daño (la pendiente de la curva) con la fluencia.

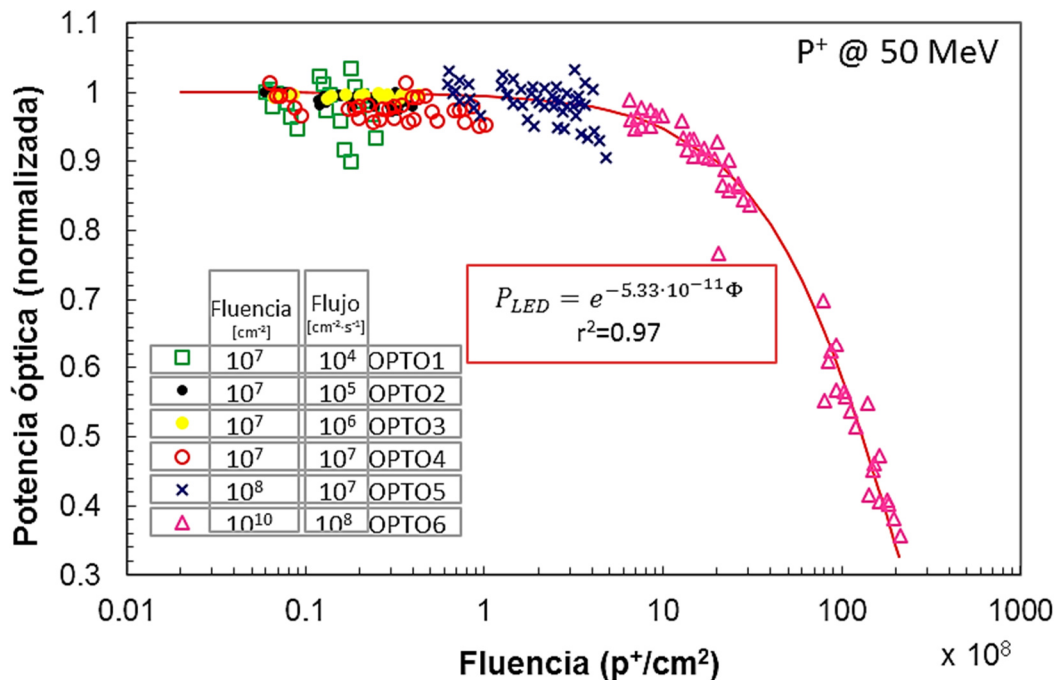


Fig. 4-24. Potencia óptica normalizada del LED S9338 de LDT, en función de la fluencia acumulada. De esta gráfica han sido eliminados los puntos correspondientes a los flujos de las tarjetas OPTO1 y OPTO3 por tener un ruido excesivo. Se representa la línea de tendencia exponencial que mejor se ajusta

El parámetro  $a$  del ajuste exponencial,

$$P_{LED} = e^{-a \cdot \Phi}, \quad 4-12$$

se muestra en la Tabla 4-17, junto con su error estadístico. La pendiente de esta curva es el factor de daño. Para obtener su expresión en función de la fluencia, no hay más que derivar:

$$K_{LED}(\Phi) = \frac{dP_{LED}}{d\Phi} = -a \cdot e^{-a \cdot \Phi} \quad 4-13$$

en donde  $K_{LED}$  es el factor de daño expresado en  $\text{cm}^2$ ;  $\Phi$  es la fluencia en  $\text{cm}^{-2}$ ;  $a$  es el factor de daño inicial ( $a = k_{LED}^i$ ). Por lo que se puede reescribir la ecuación 4-12 y 4-13 de la siguiente forma:

$$P_{LED}(\Phi) = e^{(-k_{LED}^i \cdot \Phi)} \quad 4-14$$

$$k_{LED}(\Phi) = -k_{LED}^i \cdot e^{(-k_{LED}^i \cdot \Phi)} \quad 4-15$$

Para mostrar el comportamiento se representa en la Fig. 4-25 esta función, junto con un hipotético caso en el que el factor de daño es constante e igual a  $k_{LED}^i$ .

Tabla 4-17. Parámetros del ajuste exponencial (“ $y=e^{a \cdot x}$ ”) de la potencia óptica normalizada del LED S9338 con la fluencia. Se ha obtenido un  $r^2=0,97$

Parámetro	Valor	Error	Erro %
$k_{LED}^i$	$5,3318 \cdot 10^{-11}$	$9,2 \cdot 10^{-13}$	1,7%



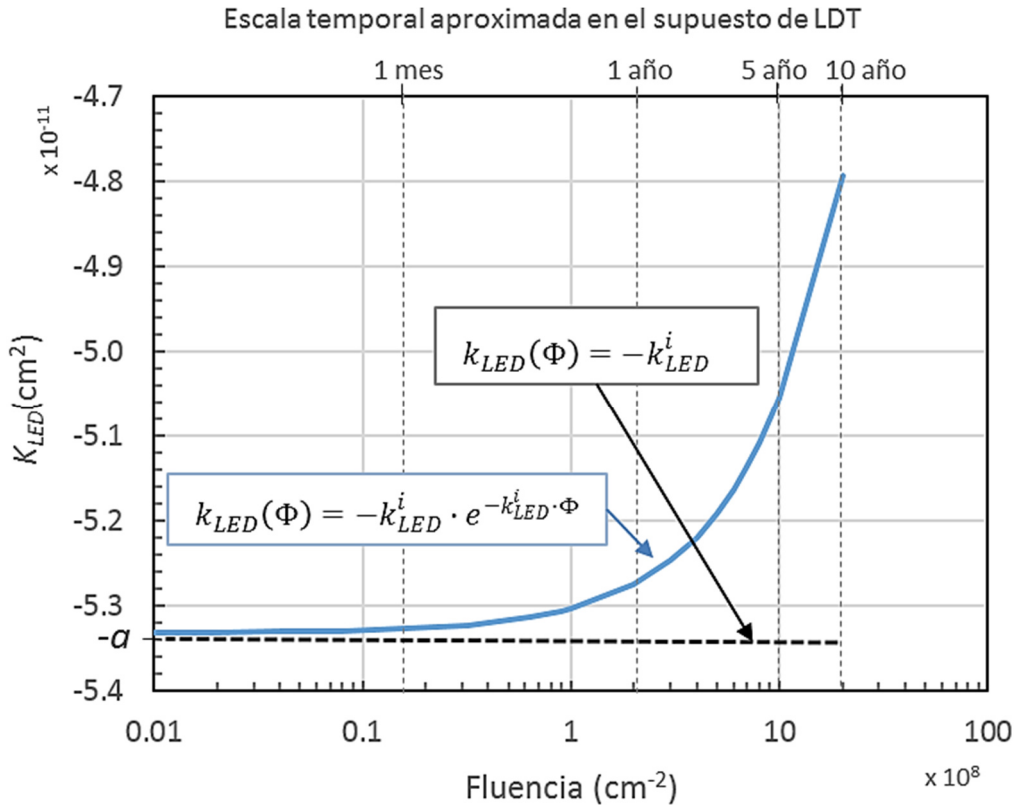


Fig. 4-25. El modelo exponencial y el lineal del factor de daño de la potencia de emisión del LED ( $k_{LED}$ ), en función de la fluencia acumulada y del tiempo de misión de LDT a bordo de NANOSAT-1B

A pesar de que el factor de daño no es constante, y de que la degradación de la potencia óptica de emisión del LED no es una línea recta (ecuación 4-14), se podrá aproximar como tal:

$$P_{LED}(\Phi) \approx 1 - K_{LED}^i \cdot \Phi \quad 4-16$$

Aplicando esta aproximación se estaría subestimando la medida de la fluencia en un valor  $< 5\%$ , si el  $\Phi < 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , es decir, si el tiempo transcurrido es  $< 10$  años, para el caso concreto de LDT en NANOSAT. La figura Fig. 4-26 muestra el porcentaje con el que se subestima la medida en función del valor de la fluencia. También se representa la potencia de emisión del LED calculada por el modelo lineal (ecuación 4-16), y por el modelo del decaimiento exponencial (ecuación 4-14).

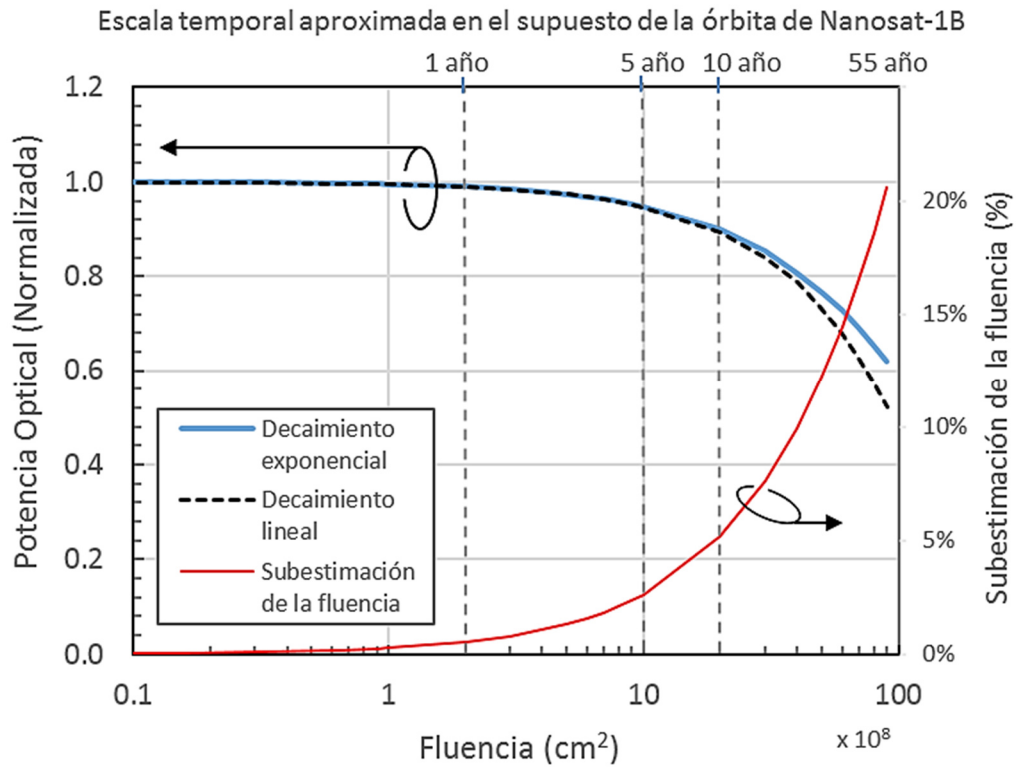


Fig. 4-26. Potencia óptica normalizada del LED S9338 de LDT en función de la fluencia acumulada. De esta gráfica han sido eliminados los puntos correspondientes a los flujos de las tarjetas OPTO1 y OPTO3 por tener un ruido excesivo. Se representa la línea de tendencia exponencial que mejor se ajusta

Se pasará ahora al estudio de la dependencia de la degradación de los LED con el flujo de protones. Para ello se muestra en la Fig. 4-27, otra vez, la potencia normalizada de emisión de los LED en función de la fluencia acumulada. La diferencia con la Fig. 4-24 (que antes mostraba estos mismos datos), estriba en que ahora se han realizado cinco ajustes diferentes, cada uno de ellos a los datos de las muestras irradiadas en condiciones diferentes (de OPTO2 a OPTO6). Los datos muestran un nivel elevado de ruido, superior al 15%. Especialmente en OPTO1 (el del flujo más bajo), cuyo factor de daño no ha podido ser calculado con una incertidumbre razonable.

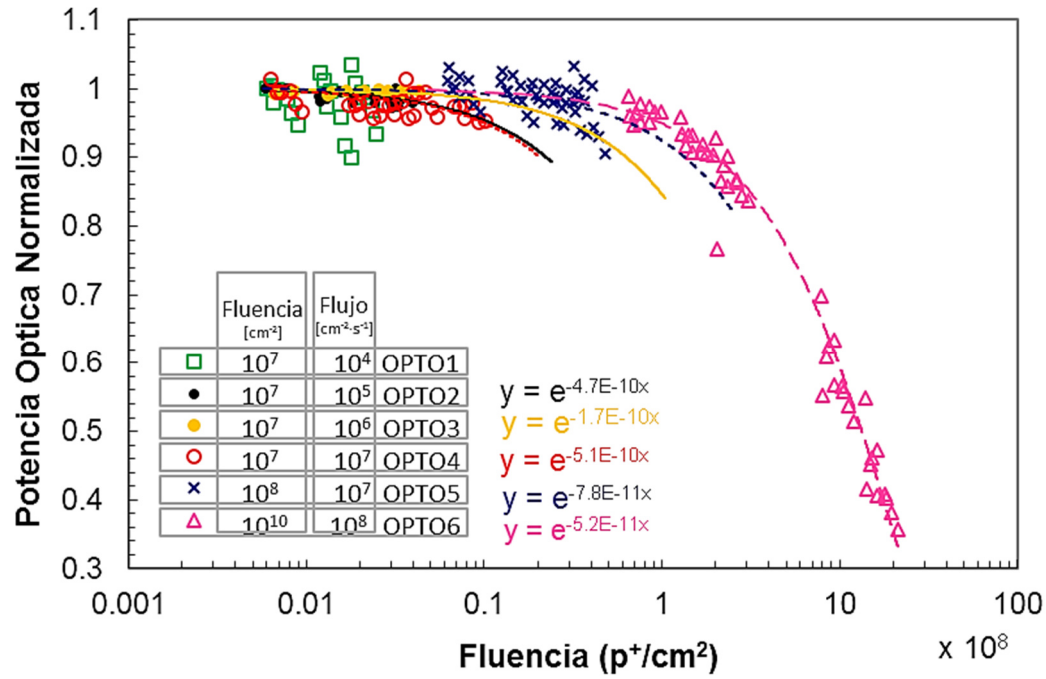


Fig. 4-27. Potencia óptica normalizada del LED S9338 en función de la fluencia acumulada. Los datos representados corresponden a irradiaciones realizadas con tres flujos diferentes ( cada uno en un color distinto) que corresponden a distintas tarjetas de irradiación

Para la comparación del factor de daño en diferentes condiciones de irradiación, se representan todos los  $K_{LED}^i$  calculados en la Fig. 4-28.

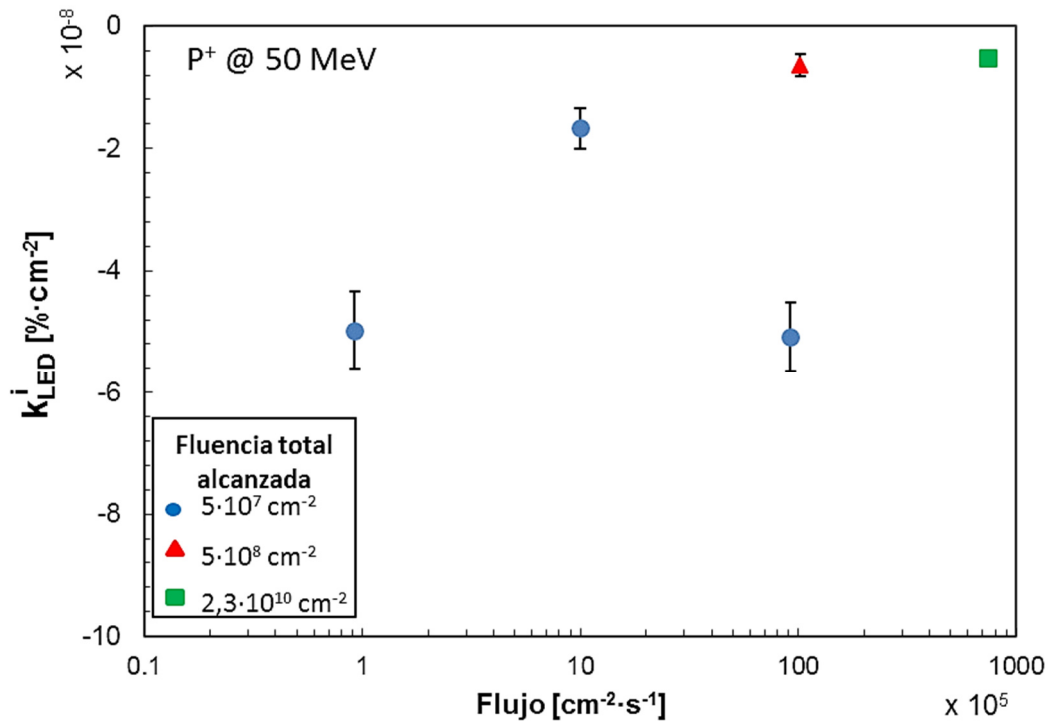


Fig. 4-28. Factor de daño inicial del LED S9338 de LDT en función de flujo de irradiación

A la vista de los resultados mostrados no se puede concluir que haya una dependencia del factor de daño de los LED con el flujo. Sin duda esto hubiera requerido un estudio más detallado, quizá haber repetido la irradiación mejorando la relación señal/ruido por alguno de los siguientes métodos: diferente plan de ensayo (usando los mismos flujos bajos, pero acumulando más fluencia para producir más daño y con ellos más señal); un montaje opto-mecánico que incluyera esferas integradoras para mejorar el reposicionado; haber evitado el reposicionamiento diseñado un sistema de irradiación activa para LED; o quizá disminuir el ruido eléctrico con un sistema de adquisición distinto. Sopesando todas estas opciones, y como se trataba de un experimento, se decidió seguir adelante y tener estos detalles en cuenta durante la calibración del instrumento. La calibración de LDT tendría dos de estas mejoras de manera “automática”: sistema electrónico de mayor calidad (la electrónica de vuelo del instrumento) y la irradiación es activa evitando el reposicionamiento.

Durante la calibración del LDT se esperaba obtener unos datos de “mejor calidad” a un flujo “bajo”. Esos datos serían comparados con la degradación en vuelo (a flujos “muy bajos”) para verificar si cuadraban o no, y así determinar si el factor de daño de los LED obtenido en laboratorio es semejante al de vuelo. Adelantando resultados, se puede decir que sí, que operando en condiciones en el que el *annealing* es despreciable, el comportamiento en vuelo es el mismo que en un acelerador de partículas.

#### 4.3.2.2 Factores que afectan al “*annealing*”

Al igual que en el caso de los fotodiodos, con los LED también se realizaron pruebas del ritmo de recuperación de sus parámetros. Se probaron en dos condiciones diferentes: alimentándolos con la corriente máxima especificada para operar el LED, y apagados. Estos resultados fueron publicados en [Jim06]. De esa publicación se han extraído la Fig. 4-29 y Fig. 4-30 en la que se aprecia que la recuperación producida bajo una inyección de corriente oscila entre un 5% y un 50%, dependiendo del dispositivo. Pero es prácticamente inexistente si permanecen apagados. Se ha encontrado que la mayoría de los LED analizados sufren recuperaciones inferiores al 5%. Esto indica que siempre y cuando los LED se alimenten a bajas corrientes y durante poco tiempo, no sufrirán un *annealing* importante. Por ello, se establece que los LED deben ser encendidos solo el tiempo imprescindible, y con una corriente baja, para su uso en LDT.

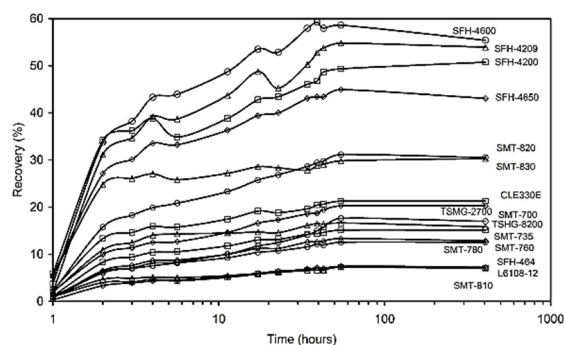


Fig. 4-29. Recuperación de los LED alimentados a la máxima corriente que soportan. [Jim06]

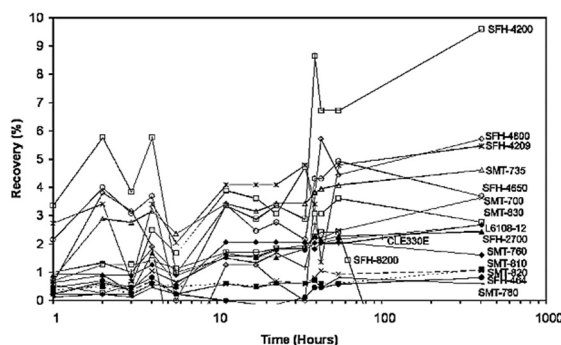


Fig. 4-30. Recuperación de los LED sin alimentar. [Jim06]

Durante la explotación se ha apreciado un ligero cambio de tendencia en la degradación de los LED. Este cambio de tendencia está influenciado, precisamente, por el tiempo que el dispositivo pasa encendido durante las medidas, el cual fue modificado en un par de ocasiones a lo largo de la explotación (§8.3.3.1)

## 4.4 Conclusiones

LDT mide la fluencia de protones en base a la degradación que sufren por DD dos dispositivos diferentes: un LED y un fotodiodo. Además, el fotodiodo se usa también para medir el flujo de protones por efectos de ionización directa. Por tanto, ambos elementos son sensibles a la radiación.

La magnitud sensible del LED es la potencia óptica emitida, la cual decrece con la fluencia recibida. Para medir la potencia óptica del LED se usa un fotodiodo, la degradación de la responsividad de este fotodiodo es despreciable frente a la degradación del LED, y así el efecto observable del conjunto LED-fotodiodo, depende casi exclusivamente de la del LED. La sensibilidad del LED a los DD es lo que se ha llamado factor de daño del LED ( $K_{LED}$ ).

Los fotodiodos que se emplean en LDT cuentan con dos magnitudes sensibles: la corriente de oscuridad, la cual aumenta con la fluencia de  $p^+$  y es proporcional a los daños permanentes por desplazamiento, y el efecto transitorios de ionización, que es un aumento de la corriente proporcional al flujo. En ambos casos se trata de una corriente generada en el fotodiodo, la primera es una corriente de fuga, y la segunda una corriente de ionización.

El LED seleccionado para LDT fue el **L9338** de la firma *Hamamatsu*. De los 31 tipos de LED probados, el L9338 es el que más se degrada a consecuencia de los DD.

En cuanto al fotodiodo, se decidió que fuera alguno de la familia del S5106 de *Hamamatsu* (el S7510 o el S5107 o el propio S5106). La fotosensibilidad de estos fotodiodos es robusta a la radiación, su corriente de oscuridad aumenta notablemente con los DD, y en las irradiaciones con gamma mostró sensibilidad a los efectos transitorios de la ionización. De los 19 tipos de fotodiodos irradiados, esta familia no era la más sensible a la radiación, pero factores relacionados con su tamaño, geometría y tipo de encapsulado, fueron decisivos para que finalmente fueran los seleccionados. La decisión final vino de la mano de la caracterización del NIEL que se hizo sobre tres de los miembros de esta familia de fotodetectores. El resultado fue que el **S5107** de *Hamamatsu* tenía el factor de daño de la corriente de oscuridad con el valor más alto de los tres, y por eso, se seleccionó como sensor de DD para LDT.

**El NIEL de los protones** (en el rango energético comprendido entre 10 y 70 MeV) sobre estos fotodiodos se ha expresado normalizado a una energía de 50 MeV, y ha sido **comparado con el NIEL obtenido por Summers** [Sum93] y **por Huhtinen** [Huh93] (proporcionados por [Vas00]). Se ha encontrado que los valores **son compatibles** entre sí (Fig. 4-15 y Tabla 4-11).

Se ha estudiado **la dependencia del factor de daño** de los LED ( $K_{LED}$ ) y los fotodiodos ( $K_{Osc}$ ) de LDT **con la fluencia**:

- **Fotodiodo (S5107)**: el factor de daño es **independiente** de la fluencia total acumulada entre  $3 \cdot 10^6$  y  $2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ .
- **LED (S9338)**: el factor de daño muestra un **decaimiento exponencial** con la fluencia dada por la ecuación 4-12:  $k_{LED}(\Phi) = -k_{LED}^i \cdot e^{-k_{LED}^i \cdot \Phi}$ , donde  $k_{LED}^i$  es el factor de daño inicial. Adicionalmente se ha visto que durante los 10 primeros años, usar la aproximación lineal introduce errores inferiores al 5%.

Se ha estudiado **la dependencia del factor de daño** de los LED ( $K_{LED}$ ) y los fotodiodos de LDT ( $K_{Osc}$ ) **con el flujo de irradiación**:

- **Fotodiodo (S5107)**: el factor de daño es **independiente** del flujo de irradiación para flujos comprendidos entre  $10^4$  y  $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pero debido a la recuperación natural que sufre, puede llegar a ser un 50% inferior en vuelo. Se ha obtenido una ecuación función del tiempo para corregir este efecto. Se considera una conclusión del estudio de *annealing*, y será comentado después.

- **LED S9338:** no se tienen suficientes datos para determinar la dependencia del factor de daño con el flujo de irradiación. Por lo tanto el valor de  $K_{LED}^i$  ha quedado definido con una gran incertidumbre.

La relación del factor de daño con el voltaje inverso de polarización aplicado durante la medida de la corriente de oscuridad, muestra que el factor de daño es mayor cuanto mayor es este voltaje de polarización. Por lo tanto, para aumentar la sensibilidad a los DD y mejorar la relación señal/ruido, **será conveniente polarizar el fotodiodo al valor más alto posible.**

Se ha estudiado la **dependencia del factor de daño** de los LED y los fotodiodos de LDT **con el annealing**. En ambos casos el *annealing* ralentiza la degradación de los dispositivos. Pues el efecto de *annealing*, que recupera el daño, compite contra la degradación producida por los DD:

- **Fotodiodo (S5107):** se ha estudiado la recuperación de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5106, los resultados son aplicables al S5107 en base a las conclusiones de Moll en [Mol02], y a que ambos fotodiodos solo se diferencian en su tamaño. Dentro de los márgenes de incertidumbre, el efecto del *annealing* medido sobre la corriente de oscuridad del S5106 es igual que el dado por Moll. Se ha construido una función de corrección para el factor de daño del S5107 (ecuación 4-5), la cual lleva dando resultados satisfactorios durante 5 años en vuelo, a pesar de que los experimentos del propio Moll no iban más allá de 1 año.
- **LED (S9338):** el LED también sufre el efecto del *annealing*, y se ha verificado que dicho efecto se acelera por el paso de una corriente eléctrica (*enhanced current annealing*). Se ha encontrado que si el LED no se alimenta, su recuperación natural es inferior al 5%. Por ello, en primera aproximación, se utilizará el  $K_{LED}$  obtenido de la calibración de laboratorio sin aplicar ningún factor de corrección. Para minimizar el efecto del *annealing*, se reducirá tanto la corriente de alimentación, como el tiempo de encendido. Y efectivamente, se verá en los resultados de explotación que existe una “ligerísima” dependencia del ritmo de degradación de los LED en función del tiempo que pasan encendidos, este efecto se cuantifica en el capítulo de resultados (§7.6.3.1).

Como se ha visto, se obtuvieron algunos parámetros con incertidumbres demasiado altas, y en otras ocasiones, las tendencias que determinarían si las calibraciones de laboratorio son extrapolables a las condiciones de vuelo, quedaron indeterminadas. La estrategia que se siguió fue la de seguir adelante y acotar los errores de medida durante la calibración del modelo de vuelo. Después, durante la explotación, se verificaría si los resultados cuadran o no con lo esperado. En caso de no haber acuerdo, se corregirían en base a la comparación con simulaciones del entorno espacial y con monitores de radiación de referencia. Los resultados de este capítulo se agrupan en la siguiente Tabla 4-18:

Tabla 4-18. Resumen de resultados y conclusiones

Elemento sensible	Fotodiodos	LED
Dispositivo	S5107 <i>Hamamatsu</i>	S9338 <i>Hamamatsu</i>
Efectos medibles	<b>DD</b> → Aumento de la corriente de oscuridad [Efecto permanente] $I_{Osc}(\Phi) = K_{Osc} \cdot \Phi$	<b>DD</b> → Disminución de la potencia óptica emitida [Efecto permanente]
	<b>Ionización</b> → Generación de una corriente de ionización [Efecto transitorio] $I_{Ionización}(\Phi) = K_{Ionización} \cdot \Phi$	$P_{LED}(\Phi) = P_{LED}^i \cdot e^{-k_{LED}^i \cdot \Phi}$ $P_{LED}(\Phi) \approx P_{LED}^i (1 - k_{LED}^i \cdot \Phi)$
Factor de daño inicial	$-K_{Osc}-$ [A·cm <sup>2</sup> ]  (2,494 ± 0,80)·10 <sup>-18</sup> [Incertidumbre = 32%]	$-K_{LED}^i-$ [cm <sup>2</sup> ]  -(2,6 ± 2,3)·10 <sup>-10</sup> [Incertidumbre = 88%]
Factor de daño vs. Fluencia (Φ)	Constante  $K_{Osc}(\Phi) = K_{Osc}$	[ Ec: 4-12 ]  $k_{LED}(\Phi) = -K_{LED}^i \cdot e^{-K_{LED}^i \cdot \Phi}$
Factor de daño vs. Flujo (φ)	Constante  $K_{Osc}(\phi) = K_{Osc}$	No se ha podido determinar
Corrección de annealing	[ Ec: 4-5 ]  $K_{annealing}(t) = -0,0596 \cdot \ln(t) + 0,438$	Suponemos:  $K_{annealing}(t) = 1$
	$K_{Osc}(t) = K_{annealing}(t) \cdot K_{Osc}$	En base a mínima “corriente y tiempo” de alimentación
Efecto de polarización de medida	[ Ec:4-11 ]  $\frac{K_{Osc}(V_{Ext})}{K_{Osc}(12 V)} = 0,2842 \cdot \sqrt{V_{int} + V_{Ext}}$	No estudiado, con alimentaciones grandes, el “annealing” se impone
Sensibilidad al flujo [A·cm <sup>2</sup> /s]	$K_{Ionización} = 8 \cdot 10^{-14}$ [Incertidumbre = ~ 50%]	No es sensible a efectos transitorios





## 5 Diseño de LDT

*Se describe la estructura del instrumento indicando los parámetros que afectan a la señal medida, tales como los blindajes de radiación, tamaño y reflectividad de las cavidades de los pisos. También se calcula el valor que se espera que tengan las señales en vuelo y con ello se calcula el rango y resolución necesaria. Se describen también los ensayos realizados para definir estos aspectos. Por último se dan las especificaciones técnicas del instrumento terminado.*

## 5.1 Introducción

Como ya se ha adelantado, LDT es un instrumento que aprovecha la variación de las propiedades optoelectrónicas de un LED y un fotodiodo, que llamamos sensores, para medir ciertos parámetros del entorno de radiación.

La descripción que aquí se detallada se centra exclusivamente en los factores que afectan, de manera directa, a las señales medidas por LDT. Esta descripción se va a dividir en tres grupos:

- **Factores opto-geométricos:** que a su vez se dividen en parámetros que solo afectan a señales ópticas, como es el **tamaño** y **reflectividad** de la cavidad en donde están el fotodiodo y el LED, y la **distribución del blindaje** que afecta a todas las medidas.
- **Factores eléctricos:** las **alimentaciones** de los dispositivos sensores, y el **rango** y la **resolución** de medida.
- **Secuencia de ejecución de una medida:** la calidad de los datos obtenidos se ve afectada por el orden en el que los diferentes sensores se miden, el tiempo de estabilización y la frecuencia de activación.

La estrategia seguida para la determinación de los parámetros ideales de los factores anteriores se basa en una o varias de las siguientes líneas de actuación: diseño y ejecución de ensayos específicos, cálculos basados en los comportamientos teóricos o el comportamiento mostrado durante los ensayos de caracterización (§4.3). En esta sección se describen todas ellas y los resultados ideales obtenidos, los parámetros que pueden despreciarse, y al final se indican las características del modelo implementado. Estas características se han fijado llegando a un compromiso entre la situación ideal y la viabilidad de su implementación con los recursos disponibles.

## 5.2 Factores opto-geométricos

Se empezará por describir el instrumento LDT para introducir algunos conceptos y nombres específicos que se utilizará de manera general durante el resto de este trabajo de tesis. Algunos de ellos proceden de los conceptos descritos en el capítulo 2, en donde se presentó el principio de funcionamiento de LDT.

LDT está formada por dos apilamientos de sensores o “torres”. Cada una incluye ocho pisos que incluyen una pareja LED-fotodiodo. Originalmente ambas torres (#1 y #2)

iban a medir según los tres modos de operación antes descritos: (1) los DD del LED que afecta a su potencia óptica, (2) los DD del fotodiodo que afecta a su corriente de oscuridad, y (3) la señal de ionización generada en el fotodiodo. Sin embargo, los requisitos de rango dinámico y resolución no permitieron combinar los tres en una misma torre. Por esta razón, una de las torres usa los DD de los LED, y la otra los DD de los fotodiodos. La señal de ionización se puede medir en ambas torres, pero para rangos diferentes.

La estructura mecánica de LDT está formada por 8 pisos apilados que integran ambas torres. Cada piso incluye dos parejas de LED-fotodiodos (L9338 y S5107) como sensores de radiación, montados en una tarjeta electrónica (PCB – *Printed Circuit Board*), y una estructura mecánica de aluminio. Cada pareja pertenece a un apilamiento distinto. Ambos apilamientos comparten los apantallamientos lateral y trasero para que la estructura sea más ligera.

La **tarjeta electrónica** alberga no solo a los sensores de radiación de ambas torres, sino también a sus sensores de temperatura y a la electrónica de proximidad. Las ocho tarjetas son idénticas.

La **estructura mecánica de los pisos** está fabricada en aluminio, e incluye los apantallamientos laterales y el que se añade entre un piso y el siguiente. La estructura de cada piso está diseñada para sujetar la electrónica y que encajen unas en otras, facilitando el apilamiento de los pisos. Esta estructura, o marco, o soporte, es la misma para los 8 pisos.

La Fig. 5-1 muestra un dibujo de un piso de LDT. Se señalan los elementos sensores de cada apilamiento y los apantallamientos laterales. El apantallamiento *inferior*<sup>10</sup> (señalado con un 4 en la figura) es casi inexistente en esta estructura. Este viene dado por la caja de la electrónica

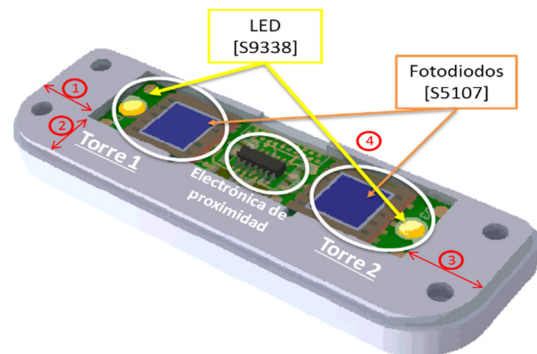


Fig. 5-1. Dibujo de un piso de LDT en el que se muestran las distintas partes y dispositivos. Se muestran también los apantallamientos laterales: 1.) Apantallamiento izquierdo 2.) Apantallamiento superior<sup>10</sup> 3.) Apantallamiento derecho 4.) Apantallamiento inferior<sup>10</sup>.

Nota<sup>10</sup>: Se ha llamado apantallamiento *superior* a “2” porque una vez fijada LDT dentro del satélite, el apantallamiento “2” quedaba hacia arriba. Por lo mismo, el apantallamiento “4” es el *inferior*.

y todas las bandejas e instrumentos del satélite, que están debajo de LDT. Es un apantallamiento “muy amplio”, ya que LDT es el que está “más arriba” de todos los instrumentos del satélite (Fig. 5-2).

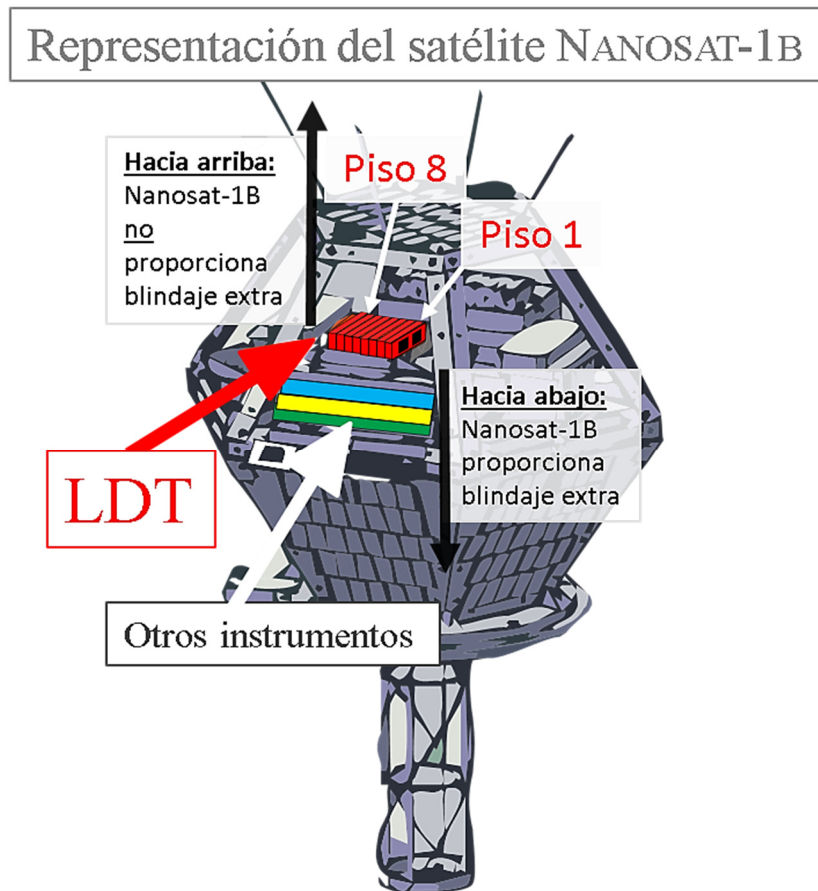


Fig. 5-2. Esquema de la posición de LDT en el interior de NANOSAT-1B, se señala la zona de “arriba” y de “abajo” del satélite, y como hacia abajo LDT está más apantallado

Una vez encajados unos pisos en otros se consigue una estructura en la que una torre queda al lado de la otra. Para completarlo se añaden sendas protecciones:

- **Estructura de protección frontal:** Proporciona un apantallamiento adicional frontal a la electrónica de proximidad. Para evitar que este escudo frene la radiación incidente sobre los elementos sensores, esta pieza tiene unos agujeros alineados con las posiciones de los LED y los fotodiodos.
- **Estructura de protección trasera:** está diseñada para añadir un apantallamiento extra por detrás y romper así la simetría longitudinal de las torres. También ayuda a ajustar la distribución de los escudos de radiación para conseguir un piso que esté igualmente apantallado desde todas las direcciones.

En la Fig. 5-3 se muestra un corte transversal de la estructura de LDT con los ocho pisos apilados, el apantallamiento trasero, el intermedio que hay entre pisos y el apantallamiento delantero.

Una vez definida la estructura de LDT, se pasará a describir como se determinaron las características de los elementos que afectan directamente a la medida. Y no solo el obvio relacionado con el espesor de los blindajes frente a la de radiación, sino también el tamaño, la forma y la reflectividad de la cavidad de un piso que afectan a la señal que el fotodiodo capta de

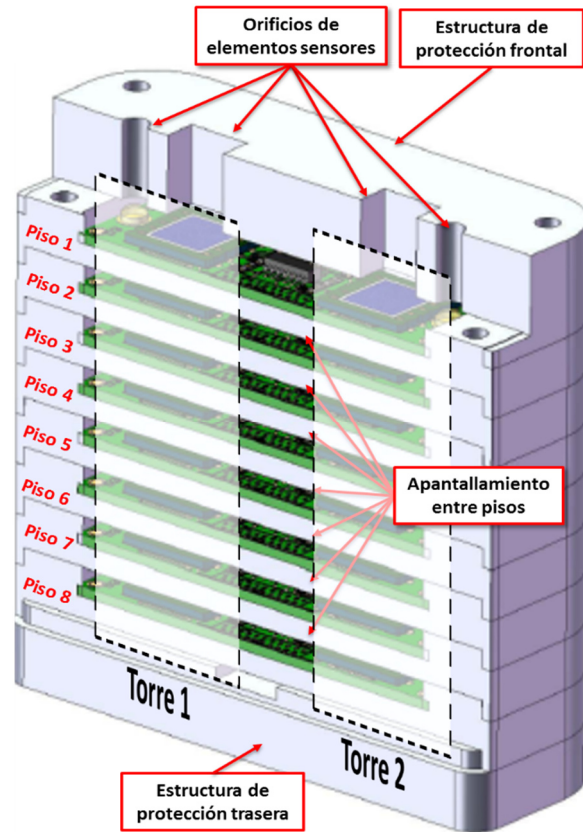


Fig. 5-3. Corte de la estructura de los pisos de LDT

la luz del LED. Igualmente importante de cara al diseño, es tener en cuenta que esta señal se verá alterada por dilataciones térmicas de la estructura. Se evaluará el valor de estas dependencias y se seleccionarán las estrategias de diseño que las minimicen, si fuera necesario.

El tamaño de la cavidad y el espesor de los blindajes afectan al peso de la estructura, el cual está limitado a 1,2 kg por requisitos estructurales del satélite. Se va a dar prioridad a la determinación del tamaño de la cavidad del piso, y una vez determinado este parámetro, se definirá cual es el espesor de todos los apantallamiento de LDT, los cuales deben estar relacionados entre sí para conseguir las simetrías descritas en la sección §2.3.

### 5.2.1 Determinación del tamaño y la reflectividad interior de los pisos

Los parámetros ideales de tamaño y reflectividad de la cavidad, son aquellos que minimizan la sensibilidad de la estructura a cambios térmicos. En este caso, cuando se habla de sensibilidad térmica de la estructura, se trata de la variación que sufre la fotocorriente del fotodiodo por un efecto térmico relacionado con la contracción o

dilatación de la cavidad. Ese cambio en el tamaño de la cavidad afecta a la cantidad de luz del LED que incide sobre el fotodiodo. Pero la temperatura también afecta directamente a los dispositivos optoelectrónicos, alterando tanto a la cantidad de luz emitida por el LED, como a la responsividad del fotodiodo.

Con el fin de determinar el tamaño ideal y la reflectividad más conveniente de la cavidad, se planificaron y ejecutaron dos ensayos utilizando una pieza de aluminio que simulaba la cavidad interior de un piso. Con el primero de los dos ensayos, se determinó el tamaño y la reflectividad, y con el segundo, se demostró que el efecto de la dilatación térmica de la estructura era despreciable frente al cambio de características del propio LED y del fotodiodo.

#### 5.2.1.1 Ensayo para determinar los parámetros adecuados

Se realizó un ensayo cuyo objetivo fue determinar las dimensiones y reflectividad del interior de la cavidad de un piso. Para ello se midió la fotocorriente generada en el fotodiodo para diferentes tamaños del piso, dos acabados superficiales distintos (uno brillante y otro pintado de negro), y tres alimentaciones del LED (2 mA, 5 mA y 15 mA).

Para este ensayo se fabricaron dos estructuras. La primera estaba formada por un bloque de aluminio con una oquedad rectangular, de las dimensiones de la tarjeta electrónica de un piso<sup>11</sup> de LDT, y la segunda por un bloque que se introduce en la oquedad que hace las funciones de “techo” de la cavidad. Dentro de la oquedad se alojaba una tarjeta que simulaba la PCB de los pisos, con un LED y un fotodiodo.

El bloque que imitaba el piso fue fijado a una mesa óptica, y la estructura que hacía las veces de techo fue unida a un desplazador lineal micrométrico, de tal forma que se podía regular cuanto se introducía dentro de la cavidad y ajustar la posición del techo. En la Fig. 5-4 pueden verse tres imágenes del montaje en las que se aprecia, de izquierda a derecha: el conjunto completo, un detalle de los dos bloques separados, y un detalle del interior en donde se ve el fotodiodo y el LED en sus posiciones reales.

Los ensayos se realizaron con dos acabados interiores diferentes:

- **Aluminio al natural:** el acabado del aluminio después de haber sido mecanizado.
- **Negro mate:** un acabado en el que se pintó de negro las superficies interiores con una pintura comercial (*Titanlux Spray Color Negro Mate – 576*).

---

<sup>11</sup> Las dimensiones de la tarjeta electrónica de un piso de LDT estaban impuestas por el diseño electrónico. Solo quedaba libertad para fijar la distancia al techo.

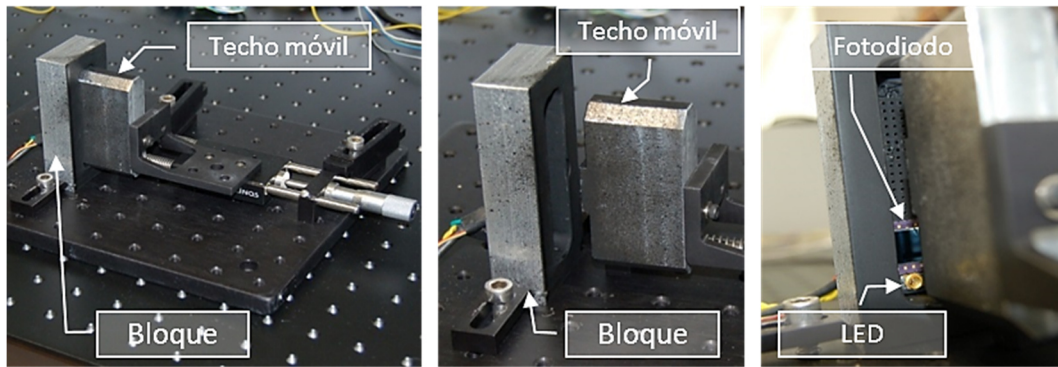


Fig. 5-4. Fotografías del montaje empleado para el ensayo de la determinación de las dimensiones y del acabado superficial de la cavidad de un piso de LDT. De izquierda a derecha: estructura cerrada; estructura con el techo abierto; estructura con el techo abierto dejando ver el fotodiodo y el LED

Las medidas se realizaron con tres alimentaciones del LED diferentes: 2, 5 y 15 mA. El recorrido barrido por el techo del piso fue de 10 mm. Se tomó como origen (0 mm) la situación en el que el techo tocaba la parte más alta de la PCB, que en este caso era la lente del LED.

Las alimentaciones del LED fueron suministradas por una fuente de corriente *Agilent E3634A*. La adquisición de la señal del fotodiodo se realizó colocando en serie una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  con el S5107. La fotocorriente se evaluó midiendo el potencial caído en dicha resistencia, se usó un voltímetro *Meterman 34XR*. El fotodiodo fue polarizado inversamente con 15 V por medio de una fuente de alimentación *Agilent E3630A*.

Los resultados obtenidos muestran que el caso de menor reflectividad tiene entre 10 y 35 veces menos señal que el caso de mayor reflectividad. El máximo de señal se alcanza con una separación del techo de 6,5 mm en la cavidad de aluminio, y con 2 mm en la cavidad negra. La Fig. 5-5 muestra la respuesta del fotodiodo normalizada para todos los casos (diferentes acabados superficiales y alimentación del LED), en función de la distancia del techo. Se señalan las corrientes máximas generadas en ambas cavidades, en el supuesto de mínima alimentación (2 mA). Se señala también, la separación de 0,7 mm que fue la seleccionada para fabricar LDT. Los motivos de esta elección están relacionados con la reducción del peso total del instrumento y con que se demostró que los efectos térmicos debido a dilataciones eran despreciables, incluso, en una cavidad de estas dimensiones.



Con el fin de minimizar el rango dinámico necesario para poder medir tanto la señal de oscuridad (del orden de pA), como la señal del LED (del orden de  $\mu\text{A}$ ) en la misma torre, era recomendable trabajar con la mínima fotocorriente posible. Por este motivo, se decidió

usar la cavidad pintada de negro y trabajar con la mínima corriente de alimentación del LED. Además, para reducir los efectos de *annealing* inducidos por la corriente es también conveniente trabajar con la corriente de alimentación del valor más bajo. Por estos dos motivos se tomó la decisión de alimentar el LED con una corriente de 2 mA.

Para minimizar las variaciones por dilataciones térmicas, se debe elegir una altura de techo en la que la fotocorriente sea insensible a pequeñas modificaciones de esta altura. En el caso de la cavidad negra esto se consigue con una separación de 2 mm. En este punto la derivada de la señal de la fotocorriente respecto de la separación se hace cero, y por ello, pequeñas dilataciones no afectan a la señal. Sin embargo, por requisitos relacionados con el peso total y las dimensiones del instrumento, se consideró más adecuado que la cavidad tuviera un tamaño de  $\sim 0,7$  mm. Para verificar si estas dimensiones eran adecuadas, se calculó, considerando el coeficiente de dilatación del aluminio y los resultados del ensayo (Fig. 5-5), cuanto sería la variación de la fotocorriente producida por un cambio de  $\pm 1$  °C de la temperatura en una cavidad de 0,7 mm con un acabado de baja relatividad. El valor obteniendo fue de  $\sim 0,65$  pA/°C. En estas mismas condiciones, la variación de la señal debida a la emisión del LED alcanza unos 5 nA/°C, usando para el cálculo, los datos de la estabilidad térmica que proporciona el fabricante del LED.

En vista de este resultado, y con el fin de optimizar la masa, el espacio y reducir de la señal de luz, se estableció que la altura optima para las cavidades de LDT fuera de  $\sim 0,7$  mm que es la que se ha marcado en la Fig. 5-5.

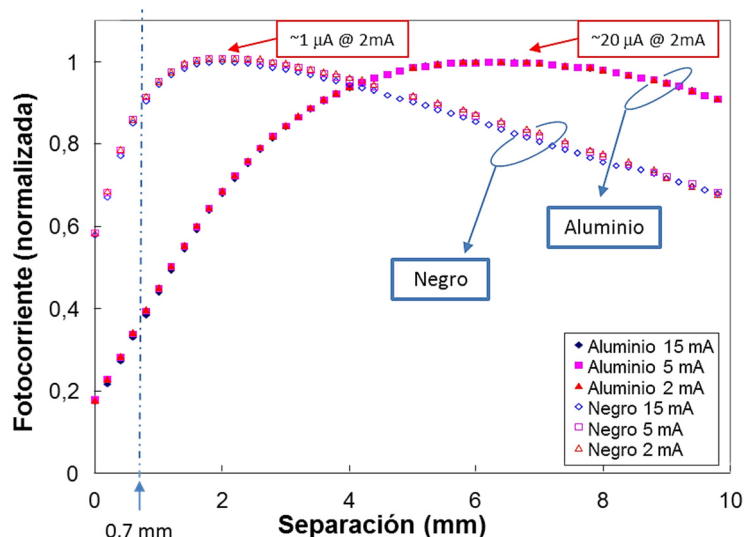


Fig. 5-5. Fotocorrientes del fotodiodo normalizadas al máximo para diferentes alimentaciones y reflectancias interiores en función de la distancia del techo

Para verificar que la dependencia térmica es como se había calculado se realizó un ensayo térmico con una cavidad con el techo separado 0,7 mm.

### 5.2.1.2 Ensayo térmico de verificación del comportamiento

Partiendo del montaje diseñado para el ensayo anterior, el techo móvil y la cavidad fueron fijados dejando una separación interior de 0,7 mm. Para fijarlo no se usó el tornillo micrométrico, pues podría afectar a las dilataciones y contracciones de la estructura, la fijación se realizó de tal forma que se simulaba la situación mecánica los pisos de LDT. Se realizó un barrido térmico entre 0°C y 80°C. Se realizó el barrido dos veces con alimentaciones distintas del LED: 2 mA y 15 mA. Las señales se midieron de forma continua, tanto en una rampa ascendente, como en una descendente. Para este ensayo se usó una cámara térmica *Binnnder MK 53*. La temperatura de la cámara se modificó a un ritmo constante de 0,19 °C/min en el caso del LED alimentado a 2 mA, y a un ritmo de 0,04 °C/min en el caso de LED alimentado a 15 mA.

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5-6 en donde se representa la sensibilidad de la fotocorriente (expresada en nA/°C) en función de la temperatura de la estructura de aluminio para las dos alimentaciones: 15 mA en rojo y 2 mA en azul. Se corrobora que los efectos son del orden de magnitud esperado para las variaciones de la estabilidad térmica de la optoelectrónica: a temperatura ambiente, en el caso de la alimentación a 2 mA el cambio es del orden de los 5 nA/°C que se había calculado con los datos del fabricante.

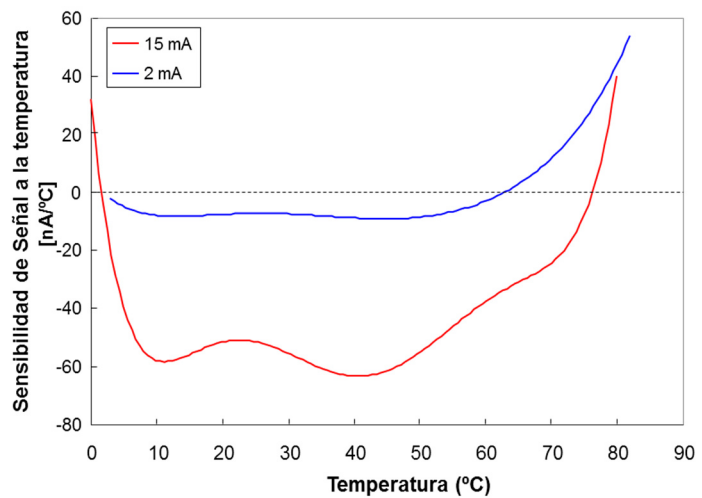


Fig. 5-6. Sensibilidad de la fotocorriente a diferentes temperaturas, en una estructura que simula un piso de LDT con el techo a 0,7 mm de la parte superior del LED

Se verifica por tanto que la variación de señal de la fotocorriente por el efecto térmico es independiente, en primera aproximación, del tamaño de la cavidad. Y por ello se considera adecuado el uso de una cavidad inferior al tamaño que era independiente de las dilataciones térmicas. Finalmente, se redujo el tamaño, y la cavidad quedó de 0,5 mm.

### 5.2.2 Determinación del espesor de los apantallamientos

El objetivo inicial era conseguir una torre cuyo último piso del apilamiento estuviera igualmente apantallado por todas direcciones (§2.3.2). Es decir, que la protección de los pisos que le preceden sea igual que la protección del blindaje lateral e igual que la protección del apantallamiento trasero.

Además, se pretendía que el último piso tuviera un apantallamiento cercano, pero no superior, a 120 MeV, que es la energía máxima proporcionada por el acelerador de protones donde estaba proyectado realizar las calibraciones (PIF del PSI). Sin embargo, los condicionantes del peso y las dimensiones fueron los que impusieron los límites al grosor de los blindajes, de forma que el apantallamiento efectivo lateral fue, finalmente, del orden de 75 MeV.

Como se ve en la Fig. 5-7, calculada a partir de los datos del poder de frenado (*Stopping power*) del aluminio para protones (datos obtenidos de [NIST\_P]), para detener completamente un protón de 100 MeV son necesarios ~ 40 mm de aluminio. LDT con este espesor de blindajes, tendría una masa de ~ 5 kg, lo cual sobrepasa el límite establecido de 1,2 kg.

Con el fin de respetar el límite de masa impuesto, se decidió reducir la masa de los blindajes a tan solo 600 g para que la masa total del instrumento fuera menor de esos 1,2 kg. En la Fig. 5-8 puede verse como estos 600 g se alcanzan con un blindaje de 12,8 mm. Este blindaje es capaz de frenar protones con energía de ~ 55 MeV. Aumentar un poco el blindaje tendría una gran repercusión en el peso, sin embargo, no mucha en el frenado de protones.

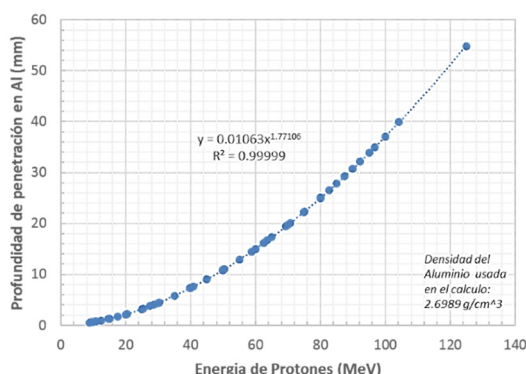


Fig. 5-7. Rango de penetración máxima de protones en aluminio expresado en milímetros. Valores obtenidos a partir de datos de [NIST\_P]

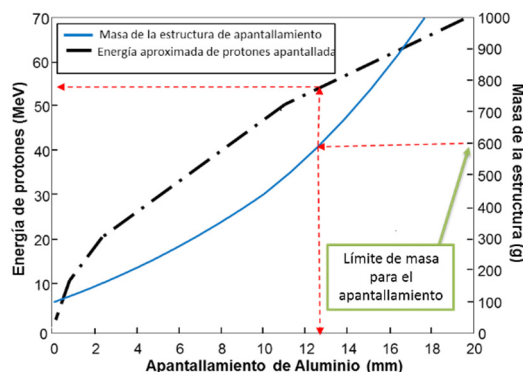


Fig. 5-8. Grafica que relaciona los milímetros de aluminio con el peso del apantallamiento y la energía máxima apantallada

Lo expuesto hasta aquí, se refiere únicamente al frendo que proporciona el blindaje que ofrece el aluminio de la estructura. Pero en realidad, el apantallamiento efectivo es mayor tal y como se explica a continuación:

- **El apantallamiento efectivo trasero** del sensor del último piso es algo mayor, pues hay que sumarle tanto la estructura trasera del empaquetado del propio dispositivo como la que aporta la estructura de piso. No es un aumento drástico y además es homogéneo y fácil de estimar: no más de 2 o 3 mm, dependiendo del apantallamiento trasero del piso.
- **El apantallamiento efectivo lateral** depende de tres factores: el encapsulado lateral del fotodiodo, otros componentes que estén a su altura y le hagan “sombra”, y el ángulo de incidencia de los protones. Es muy difícil, a priori, evaluar cuanto puede ser este efecto. Estimaciones preliminares mostraron que estos factores podían introducir entre 4 y 8 mm adicionales de apantallamiento.

El siguiente paso es el de decidir y ajustar el espesor de aluminio que se pone entre piso y piso para regular los canales energéticos y cumplir el objetivo de que el último piso esté igualmente apantallado por delante, por detrás y lateralmente.

Debido a las incertidumbres comentadas sobre el apantallamiento lateral, sería conveniente realizar simulaciones específicas de este efecto e incluso construir e irradiar un prototipo para evaluarlo de forma real. Limitaciones temporales en la ejecución del proyecto, no permitieron realizar estos ensayos, y la decisión sobre los espesores a usar fue tomada en base a las estimaciones preliminares arriba descritas. Para minimizar los riesgos se optó por estimar el espesor, de tal forma que el punto de igual apantallamiento estuviera entre el piso 7 y el 8. De esta forma, un error de sobreestimación del apantallamiento lateral movería el piso de referencia hacia el piso 7, y uno de subestimación hacia el piso 8. La Tabla 5-1 Escudos de aluminio propuestos para LDT muestra los apantallamientos calculados.

Tabla 5-1 Escudos de aluminio propuestos para LDT

Escudo	Espesor de aluminio [mm]	Espesor de aluminio efectivos entre pisos 7 y 8 [mm]	Criterio de selección	Función
Frontal	15,7	N.A	Peso máximo permitido	Proteger electrónica de proximidad de los pisos
Trasero	12,4	15,4 – 18,4	Peso máximo permitido	Eliminar los protones de baja energía que inciden desde atrás
Lateral	11,5	15 – 19	Peso máximo permitido	Eliminar los protones de baja energía que inciden lateralmente
Entre pisos	0,5	18 – 21 Frontalmente	Igualar el apantallamiento lateral, trasero y frontal entre los pisos 7 y 8	Ajustar el apantallamiento del último piso

### 5.3 Factores eléctricos

En este apartado se describe y justifica cuáles son los parámetros eléctricos que afectan a la medida de radiación y cuál es la variación esperada en las corrientes de ionización, fotocorrientes y corrientes de oscuridad, para fijar el rango dinámico de funcionamiento y la resolución de medida. Para describir como se han calculado estos parámetros y mostrar los resultados, la sección se ha dividido, en 3 apartados. En los dos primeros se calculan y discuten dichos parámetros de forma independiente para cada una de las torres y cada uno de los modos de medida, y en el último, se han combinado todos los resultados para dar un criterio global de funcionamiento.

#### 5.3.1 Requisitos de la alimentación eléctrica de los sensores

La alimentación de los fotodiodos es por medio de una polarización inversa<sup>12</sup> de voltaje, y la de los LED es aplicando una polarización directa<sup>13</sup>, usando una fuente de corriente para fijar el paso de corriente y que sea constante.

<sup>12</sup> En la polarización inversa se aplica el voltaje positivo en el cátodo del fotodiodo.

<sup>13</sup> En la polarización inversa se aplica el voltaje positivo en el ánodo del fotodiodo.

**Fotodiodo.** Según se explica en el sección de la caracterización de los fotodiodos (Fig. 4-21 y Fig. 4-22 del apartado §4.3.1.3), la corriente de oscuridad reduce drásticamente su sensibilidad a los daños por desplazamiento para polarizaciones inversas por debajo de 0,5 V. A partir de polarizaciones inversas de 1 V tiene una ligera tendencia a aumentar conforme aumenta esta polarización.

Partiendo de estas premisas, se determina que la polarización del fotodiodo debe ser lo más alta posible dentro de los límites de funcionamiento marcados por el fabricante (20 V) y, a ser posible, superior a 1 V. La decisión final se tomó en base a las alimentaciones disponibles en el satélite, eligiendo la mayor de ellas: 12 V.

**LED.** La alimentación del LED había sido fijada en 2 mA, según se explicó en §5.3.1. De esta forma, la señal recogida en el fotodiodo es del orden de 1  $\mu$ A. Lo que se persigue es alimentar el LED con la mínima intensidad de corriente que mantenga su señal estable. Como se comentó, el criterio para elegir una corriente de baja intensidad, tiene una doble intención: minimizar el *annealing*, y tratar que la señal recogida en el fotodiodo sea baja para poder medir sobre un mismo fotodiodo la fotocorriente con el LED encendido y la corriente de oscuridad con el LED apagado.

En la Tabla 5-2 se recogen los valores de estos requisitos de alimentación.

Tabla 5-2. Requisitos de alienaciones de los sensores de radiación

Dispositivo	Máxima alimentación	Mínima alimentación	Criterio de selección
Fotodiodo	-2 V <sup>(1)</sup>	- 20 V <sup>(1)</sup>	Sensibilidad a la radiación
LED	4 mA	1 mA	1. Evitar <i>annealing</i> . 2. <i>Compatibilidad</i> <sup>2</sup> entre fotocorriente y corriente de oscuridad.

*Nota 1: El signo negativo hace referencia a que es una polarización inversa.*

*Nota 2: Cuando se dice que la corriente de oscuridad y la fotocorriente sean compatibles se quiere decir que la corriente de oscuridad sea despreciable frente a la fotocorriente, pero que el rango dinámico de medida permita medir ambas magnitudes, una con el LED encendido y la otra con el LED apagado*

### 5.3.2 Requisitos del rango y resolución de medida

Cabe recordar que la señal obtenida en todos los modos de medida es una corriente generada en el fotodiodo. Esta corriente, dependiendo del modo de trabajo, puede ser:

- **Una corriente de oscuridad** que es proporcional a los DD acumulados en el fotodiodo.
- **Una fotocorriente** que disminuye con los DD acumulados en el LED debido a que este se degrada reduciendo la cantidad de luz que emite, y por tanto iluminando menos al fotodiodo.
- **Una corriente de ionización** que es proporcional al flujo de protones incidentes.

Cada tipo de señal tiene su propio rango dinámico de funcionamiento, y su medida requiere una resolución de 0,1%. Por ello, para que coexistan todos los modos de medida se debe conseguir que se cumpla el caso más restrictivo: el rango dinámico más alto junto con la mejor resolución de todos los casos.

La resolución de 0,1% se ha fijado en base a la propagación de incertidumbres en el modelo matemático de LDT. Suponiendo incidencia frontal de protones, la incertidumbre en la determinación de la energía más alta, solo se ve afectada por las incertidumbres relacionadas con el piso 8 (el ruido de su señal, la incertidumbre de los parámetros de su calibración, sus variaciones térmicas...), pero la incertidumbre en la determinación de la fluencia de la energía más baja, depende de la incertidumbre de todos los pisos del sistema. En concreto, una incertidumbre del 1% en los parámetros de todos los pisos se propaga hasta el piso 1 resultando en este piso una incertidumbre de ~ 50%. Por ello, es crucial minimizar las incertidumbres de todos los pisos, y el primer paso es diseñar el instrumento con una buena resolución. Se ha impuesto como criterio, que la resolución sea el 0,1 % de la señal más baja a medir.

Para estimar el cambio en la señal de los sensores hay que partir de dos datos: el entorno de radiación esperado y las sensibilidades de los dispositivos a la radiación. Los primeros se obtuvieron de [Iba07] (Fig. 5-9 y la Fig. 5-10) y los segundos de las caracterizaciones de los elementos sensores mostradas en la sección §4.2.

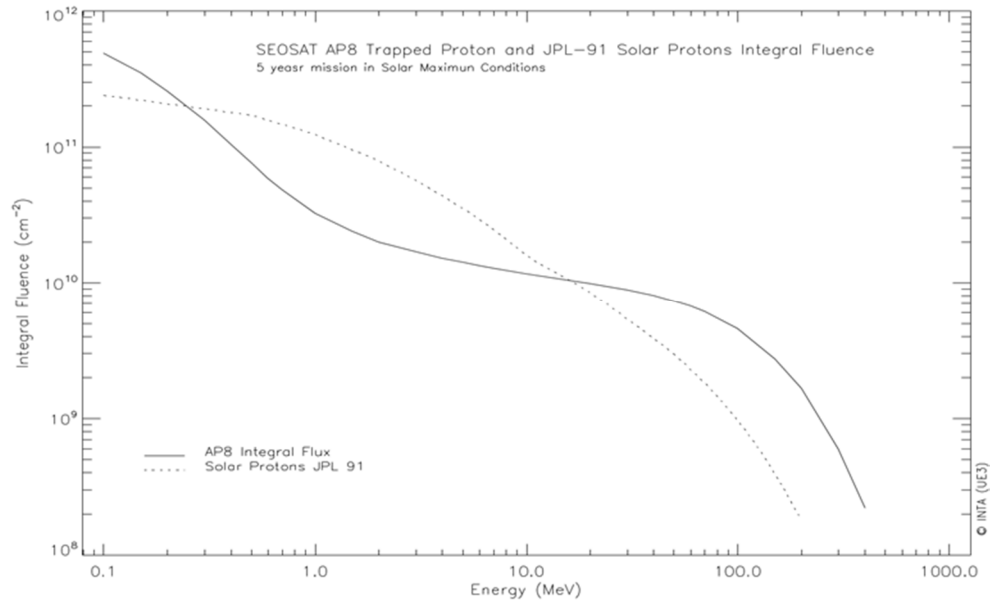


Fig. 5-9. Simulación de un entorno de radiación similar al del satélite NANOSAT-1B. Simulación realizada con los datos orbitales del satélite SEOSAT/INGENIO [Iba07]

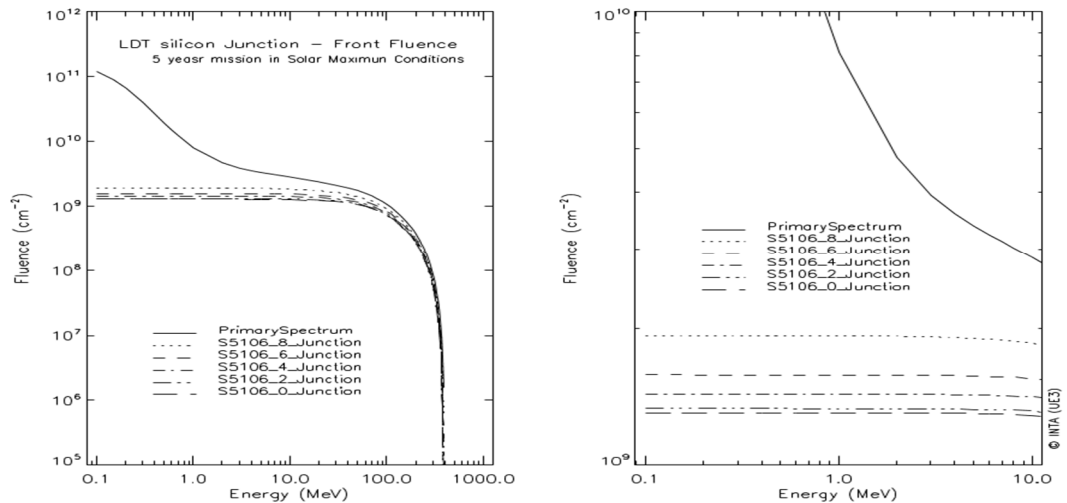


Fig. 5-10. Propagación del entorno de radiación similar al de NANOSAT-1B. Simulación realizada con los datos orbitales del satélite SEOSAT/INGENIO [Iba07]

### A. Corrientes de oscuridad

De la simulación del entorno de radiación de LDT se obtiene la cantidad de protones equivalentes de 10 MeV que alcanzan cada piso. La Tabla 5-3 muestra las situaciones extremas de esta simulación:



Tabla 5-3. Muestra el mejor y peor caso de la fluencia equivalente de protones de 10 MeV acumulada en los pisos de LDT. Datos obtenidos de [Iba07] para una órbita similar a la de NANOSAT-1B

Caso bajo estudio	Fluencia equivalente de 10 MeV acumulada en 2 años [cm <sup>-2</sup> ]
Mejor caso	$0,592 \cdot 10^9$
Peor caso	$0,472 \cdot 10^9$

El factor de daño de la corriente de oscuridad para protones de 50 MeV es  $\sim 2,5 \cdot 10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$ . Para transformarlo a protones de 10 MeV se usa el NIEL (en este caso, multiplicar por 2,2) y se obtiene  $5,5 \cdot 10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$ . Multiplicando la fluencia esperada y el factor de daño del fotodiodo (sensibilidad) se obtiene el aumento estimado de corriente, la cual se muestra en la Tabla 5-4. En los datos de esta Tabla se ha incluido un margen de seguridad  $\times 2$ .

Tabla 5-4 Estimación del aumento de la corriente de oscuridad (mejor y peor caso)

	Aumento de corriente tras 2 años de misión [nA]	Aumento de corriente por semana [pA]	Resolución requerida <sup>1</sup> [fA]
Mejor caso ( $\times 2$ )	6,4	62	62
Peor caso ( $\times \frac{1}{2}$ )	1,3	12	12

*Nota 1: Un 0,1% de la señal a medir, en este caso, el aumento de corriente esperada en una semana*

Otro factor importante a tener en cuenta, es el valor absoluto de la corriente de oscuridad que, para el caso del S5107, es del orden de 500 pA a temperatura ambiente al inicio de la misión, pero tras 2 años se estima que puede llegar hasta 6,4 nA. Teniendo en cuenta que la corriente de oscuridad tiene una dependencia exponencial con la temperatura, y que el estudio térmico de la misión predice que la temperatura de LDT podría llegar a alcanzar 40°C, se podrían esperar valores de la corriente de oscuridad de hasta 22,4 nA.

## B. Fotocorrientes

En este caso vuelve a aplicar la tabla 5-3 para la estimación del peor y mejor caso de la fluencia de protones recibida. Con una fotocorriente de 1  $\mu\text{A}$  el factor de daño estimado en el apartado §4.3.2.1, oscila entre  $5,0 \cdot 10^{-16} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$  y  $0,5 \cdot 10^{-16} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$ . Con ambos datos se calcula el mejor y peor caso mostrado en la tabla 5-5. Para el cálculo se ha supuesto la dependencia lineal explicada en ese mismo apartado.

Tabla 5-5. Estimación de la disminución de la fotocorriente (mejor y peor caso) en base a las simulaciones [LTD/4520/TNO/001/INTA] y el factor de daño medido durante la caracterización de los dispositivos

	Corriente inicial @ 2 mA	Factor de Daño	Disminución de corriente tras 2 años de misión	Disminución de corriente por semana	Resolución requerida <sup>1</sup>
	[ $\mu$ A]	[A·cm <sup>2</sup> ]	[nA]	[nA]	[pA]
Mejor caso ( $\times 2$ )	2	$1 \cdot 10^{-15}$	600	5,8	5,8
Peor caso ( $\times \frac{1}{2}$ )	0,5	$0,25 \cdot 10^{-16}$	11,7	0,11	0,11

Nota 1: Un 0,1% de la señal a medir, en este caso, la disminución de corriente esperada en una semana

### C. Corrientes de ionización

Con el entorno de protones estimado para este caso y la sensibilidad de los sensores al flujo de protones, se calculan las corrientes máximas esperadas en órbita por ionización directa.

Para la determinación del máximo flujo de protones esperado en esta órbita, se han comparado tres modelos de protones atrapados en máximos y mínimos de actividad solar: AP-8 [AP-8], CRREES-PRO [CREES] y BSP97 [BSP97]. Para obtener los datos del flujo de estos modelos en la órbita polar de entre 700 km y 600 km se han usado un conjunto de herramientas de simulación que la ESA proporciona en su “sistema de información de ambiente espacial” en una web de uso público (SPENVIS – *SPace ENVironmnt infromation sIStem*) [SPE].

La simulación realizada con SPENVIS proporcionó la cantidad de protones de más de 75 MeV en equivalentes de 75 MeV. Se usaron 75 MeV porque los protones de esa energía son capaces de alcanzar cualquiera de los pisos de LDT, desde la mayoría de las direcciones de incidencia.

En la Tabla 5-6 se muestran los datos correspondientes a los modelos que dieron los casos extremos: el que obtuvo el flujo más alto (marcado en rojo) y el del más bajo (marcado en azul).

Tabla 5-6. Resultados (mejor y peor caso) de los flujos máximos esperados en una órbita similar a la de NANOSAT-1B. Se han estimado los resultados con 3 modelos de protones diferentes usando las herramientas web de SPENVIS [SPENVIS]

Modelo	Flujo equivalente de protones de 75 MeV a 700 km [pfu/s]	Flujo equivalente de protones de 75 MeV a 600 km [pfu/s]
AP8 – Max Flux	2000	1600
CRRESPRO – Quite Flux	5000	3500

La sensibilidad de los fotodiodos al flujo de protones de estas energías es del orden de  $8 \cdot 10^{-14}$  A/pfu/s. Para mostrar los resultados en la Tabla 5-7, se vuelve a aplicar un margen de seguridad de  $\times 2$ :

Tabla 5-7 Estimación del aumento de la corriente de ionización (mejor y peor caso) en base a las estimaciones hechas con SPENVIS [SPENVIS] y la sensibilidad al flujo medida durante la caracterización de los dispositivos

Caso	Aumento de corriente en el centro de la AAS	Resolución necesaria <sup>1</sup>
	[nA]	[pA]
Mejor ( $\times 2$ )	80	80
Peor ( $\times 1/2$ )	6,4	6,4

*Nota 1: Un 0,1% de la señal a medir, en este caso, la corriente de ionización en el centro de la AAS*

### 5.3.3 Unificación de resultados

Para conseguir que cada torre realice los 3 tipos de medidas (corriente de oscuridad, fotocorriente y corriente de ionización), es necesario que pueda medir intensidades de corrientes de entre 500 pA (corriente de oscuridad inicial) y  $2\mu\text{A}$  (fotocorriente máxima), con una resolución de 12 fA (caso de la corriente de oscuridad). Esto supone diseñar un sistema de adquisición de datos en vuelo demasiado complejo y, por ello, se optó por especializar cada torre en un tipo de medida: una dedicada a la medida de la degradación del LED, y la otra a las medidas de corriente de oscuridad. La corriente de ionización será medida por una u otra torre, dependiendo del valor del flujo y del rango y resolución de cada una de ellas. Para identificar a cada una de las torres a lo largo del resto del trabajo, se usará una nomenclatura que indica el tipo de medida que realiza, *torre de luz* o *torre de oscuridad*, o se indicará el dispositivo que sufre la degradación o efecto medible, *torre de LED* o *torre de fotodiodos*. Es decir, *torre de luz* es equivalente a *torre de LED*, y *torre de oscuridad* es equivalente a *torre de fotodiodos*. Se usará un nombre u otro dependiendo de qué es lo que se quiera resaltar, ya sea el dispositivo sensible o el tipo de medida realizada.

La Tabla 5-8 muestra las alimentaciones de los elementos sensores, y la Tabla 5-9 el rango, la resolución y el ritmo de cambio esperado de las señales de cada uno de los apilamientos, así como el criterio seguido para fijar el valor.

Tabla 5-8. Requisitos para la alimentación eléctrica de cada uno de los elementos sensibles a la radiación

Dispositivo	Alimentación
	[valor mínimo – valor máximo]
LED → L9338	[1 – 4] mA
Fotodiodo → S5107	[-2 – -20] V

Tabla 5-9. Especificación de las señales a medir de LDT

		Valor	Criterio usado
Torre de LED o torre de luz	Rango [μA]	2	Mejor caso DD en el LED  [Tabla 5-5]
	Resolución [fA]	110	Peor caso DD en el LED  [Tabla 5-5]
	Ritmo de cambio [pA/semana]	[-110 , -5800]	Peor y mejor caso DD en el LED  [Tabla 5-5]
Torre de fotodiodos o torre de oscuridad	Rango [nA]	80	Mejor caso Ionización en el fotodiodo  [Tabla 5-6]
	Resolución [fA]	12	Peor caso DD en el fotodiodo  [Tabla 5-4]
	Ritmo de cambio [pA/semana]	[12 , 62]	Peor y mejor caso DD en el fotodiodo  [Tabla 5-4]

## 5.4 Secuencia de medida en órbita

Como se ha descrito, las medidas de LDT se ven afectadas por parámetros ópticos (el tamaño y la reflectividad de la cavidad de un piso) y por parámetros eléctricos (alimentación de los sensores, rango dinámico y resolución). Se pasa ahora a estudiar los efectos que produce la secuencia de medida, es decir, el orden de ejecución de las medidas, los tiempos de estabilización de las señales y el tiempo de duración de una medida completa de LDT.

La adquisición de una “medida completa” está compuesta por todas las señales de LDT: las corrientes de todos los fotodiodos de los dos apilamientos (uno con los LED encendidos y el otro con los LED apagados, y todos los pisos) y la temperatura de cada una de ellos:

$$\underbrace{8}_{\text{pisos}} \times \underbrace{2}_{\text{torres}} \times \underbrace{2}_{\text{señales}} = \underbrace{32}_{\text{datos}} \quad 5-1$$

(corriente y temperatura)

El factor más importante es la duración total de una medida completa, pues determina la frecuencia de medida en órbita, que es importante para la caracterización de la AAS. Cabe recordar que la radiación en una órbita LEO se distribuye de forma no homogénea, concentrándose en la AAS. Para obtener un mapa de la distribución de radiación de la AAS, la frecuencia de medida debe ser relativamente alta de forma que permita tomar suficientes puntos mientras la sobrevuela. En concreto, atravesar la AAS en una órbita LEO supone unos 15 minutos. Dado que una medida completa requiere de la adquisición de 32 datos (algunas de ellas necesitan cierta estabilización) es necesario coordinar la secuencia de medidas para optimizar el tiempo disponible.

Hay tres puntos clave en relación a la secuencia de medida y su duración: la estabilización óptica de la emisión de los LED, los efectos térmicos y los efectos relacionados con que la luz de un piso pueda afectar a otro, lo que se llamará aislamiento óptico entre pisos.

Los efectos térmicos son debidos a dos factores: el auto-calentamiento de un dispositivo, y el calentamiento producido por otros dispositivos. El primero se produce al alimentar un dispositivo con una corriente eléctrica, y el segundo cuando un dispositivo alimentado calienta su entorno afectando a otros dispositivos. En el caso de LDT son importante porque las propiedades, tanto del LED como del fotodiodo, dependen notablemente de la temperatura, y con ello las señales que se miden.

El auto-calentamiento induce una variación temporal que es más rápida al principio y que tiende a estabilizarse con el paso del tiempo. En el caso de los LED, es un efecto muy acusado y necesita varios minutos para estabilizarse completamente. Para minimizar el tiempo de medida se planteó encender todos los LED a la vez, esperar el tiempo de estabilización, y después realizar la medida de todos los pisos y sensores simultáneamente. Este modo de actuación conseguiría una frecuencia de medida muy alta una vez que los LED estuvieran encendidos. Para poder implementar esta solución era necesario que la luz de los LED de unos pisos no afectase a las señales medidas en los adyacentes. La estanqueidad óptica entre pisos se hizo necesaria.

Para determinar el nivel de señal de luz que se filtra entre los pisos y entre las torres, y verificar si afectaba a las medidas, se diseñó y ejecutó un ensayo específico de estanqueidad óptica, del que se hablará a continuación.

### 5.4.1 Ensayo de aislamiento óptico

Este ensayo se llevó a cabo con un modelo estructural (STM – *Structural Model*) de LDT fabricado para ensayos mecánicos y ambientales. Este modelo de LDT tenía una separación entre la parte más alta del LED y el techo, de 0,5 mm. Además, su interior no había sido pintado de negro por lo que se trabajó con un caso peor, un caso con mayor reflectividad, y por ello se supone que menos aislamiento óptico.

La Fig. 5-11 muestra tres imágenes de los pisos del Modelo de Ensayos de LDT. En la primera se ven algunos pisos desmontados con las tarjetas de fotodiodos y LED en su interior; la segunda muestra la estructura montada y se aprecia como, de algunos pisos, sale el cableado que permitía realizar las medidas; y en la tercera se muestra la estructura ya rodeada de cinta de aluminio para evitar que se filtre luz del exterior. Para mejorar el aislamiento óptico con el exterior, se sacaron los cables de conexión en *zigzag* y las juntas se repasaron con doble capa de cinta de aluminio, contrapeando las uniones; por último, para sellar aún mejor, los resquicios fueron tapados con masilla fijadora *Blu-Tack*®. Era clave aislar la estructura ópticamente del exterior, ya que algunas de las medidas eran las de corriente de oscuridad, y por ello, cualquier filtración de luz externa podría enmascarar los resultados.

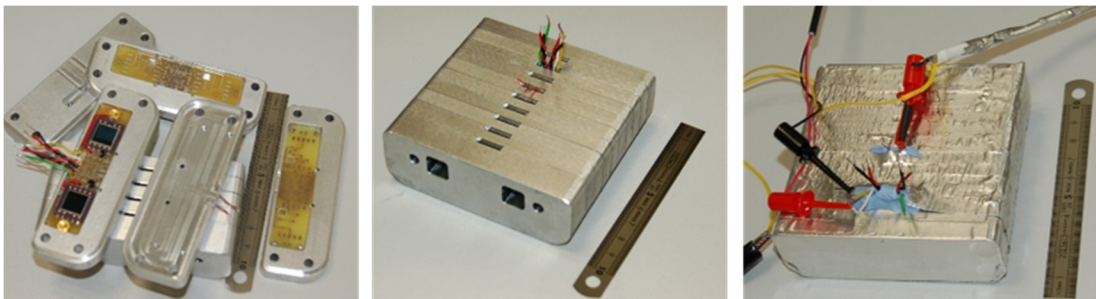


Fig. 5-11. Fotografías de los pisos de LDT durante las medidas de estanqueidad óptica. De izquierda a derecha: pisos y tarjetas electrónicas desmontados; estructura con los ocho pisos montados; estructura de los pisos totalmente encintados y aislados ópticamente de la luz exterior

Como la electrónica de los pisos no estaba terminada, se usaron solo los componentes básicos: los LED y los fotodiodos. Estos componentes fueron montados en dos tarjetas: una con ambos componentes y la otra solo con los fotodiodos. En el resto de pisos, “no activos”, se colocaron tarjetas vacías.

La tarjeta que tenía montados los LED y los fotodiodos fue situada en el octavo piso (el más bajo de la torre), que se llamó piso emisor. La tarjeta con los dos fotodiodos fue colocándose, una a una, en todas las posiciones (piso 7, piso 6,..., piso 1) para ir evaluando cuanta luz llegaba a cada uno de esos pisos. El piso donde se colocaba esta

tarjeta con los fotodiodos, se denominaba piso detector. En todas las posiciones se medían cuatro datos para evaluar de forma real el porcentaje de luz filtrada entre pisos:

- La señal generada en el piso detector con el LED encendido.
- Las corrientes de oscuridad del piso detector (con el LED apagado).
- La señal en el piso emisor con el LED encendido.
- La corriente de oscuridad del piso emisor (con el LED apagado).

Para medir las señales de los fotodiodos (del orden de pico-amperios) se polarizaron a 10 V y se usó un amperímetro *Keithley modelo 2502* y un cable triaxial modificado en el que la malla externa fue conectada a la propia estructura de LDT para reducir el ruido. Las alimentaciones del LED (1, 2, 5, 15 y 100 mA) se suministraron con una fuente de corriente *Agilent E3634A*. La adquisición de datos fue manual. Antes de tomar la medida se dejaba un tiempo de 2 minutos para alcanzar la estabilización térmica en el LED. Las corrientes altas producían un calentamiento apreciable también en el fotodiodo, y con ello, un aumento (también apreciable) en su corriente de oscuridad. Por este motivo, la corriente de oscuridad se medía justo después de apagar el LED. Se constató lo siguiente:

Para analizar los resultados obtenidos había que compararlos con las variaciones de señal producidas por los efectos de la radiación que se querían medir. Como el protocolo establecido de funcionamiento para LDT no contemplaba la posibilidad de establecer dos secuencias de medida, una para obtener el mapa de la AAS y otra para la realización de las medidas acumulativas referentes a los DD, la comparación se tuvo que realizar con los efectos más débiles que se querían medir: los efectos acumulativos de los DD.

#### **A. Aislamiento óptico entre torres**

Según las medidas realizadas, el aislamiento óptico entre torres es muy pobre. De una torre a otra (dentro del mismo piso) se filtra un 1,3% de la luz. Esto produce señales del orden de una decena de nano-amperios. Incluso alimentando el LED a 2mA, este valor es 6 órdenes de magnitud mayor que los 12 fA de la precisión requerida en la torre de oscuridad, para determinar los DD. Si permaneciera constante en el tiempo podría no ser un problema, pero la degradación del LED por los DD produciría un cambio de 1,4 pA/semana en la señal de la torre de oscuridad. Este cambio semanal es 2 órdenes de magnitud mayor que la resolución de la torre de oscuridad. Esto significa que la

degradación de la torre de luz afectaría a las medidas de la torre de oscuridad. Por ello no se pueden usar las señales de la torre de oscuridad mientras la torre de luz está encendida.

### B. Aislamiento óptico entre pisos

La estanqueidad óptica entre pisos es sustancialmente mejor que entre torres, pero no lo suficiente como para medir dos pisos seguidos. La señal que se cuela de un piso al inmediatamente superior es de  $\sim 0,023 \%$  independientemente de la alimentación del LED. En el caso de alimentar a 2mA se midieron  $\sim 450$  pA. La resolución de un piso debe de ser de unos 110 fA, y la variación esperada en la señal por semana es de 110 pA; además, esta degradación semanal de la señal de un piso produciría en el contiguo una variación de  $\sim 25$  fA por semana; con este dato, la degradación de un piso empezaría a afectar al piso contiguo a partir de la cuarta semana, cuando la degradación de la señal filtrada en el piso contiguo fuese del orden de la resolución del mismo:

$$\underbrace{25 [pA/Semana]}_{\text{Efecto de la degradación de un piso en el consecutivo.}} \cdot 4[semanas] \approx \underbrace{110[fA]}_{\text{Resolución del piso afectado}} \quad 5-2$$

Por lo tanto, dos pisos consecutivos no deben medirse a la vez si no se desea perder resolución.

No sucede lo mismo si se salta al siguiente piso por encima del contiguo. En este caso la luz filtrada supone el  $\sim 0,0008 \%$ , y la señal generada sería de  $\sim 14$  pA; la variación por la degradación de una semana de un piso al otro sería de solo 0,9 fA. Este efecto solo se notaría después de 2,2 años, por lo que se considera despreciable.

$$\underbrace{0,9 [fA/Semana]}_{\text{Efecto de la degradación de un piso en el que esta situado dos pisos mas arriba.}} \cdot 2,2[Años] \approx \underbrace{110[fA]}_{\text{Resolución del piso afectado}} \quad 5-3$$

### 5.4.2 Conclusiones

Con este ensayo se ha demostrado que la torre de oscuridad no puede medirse mientras los LED de la torre de luz están encendidos. Tampoco se pueden medir dos pisos de la torre de luz consecutivos. Aunque se consideró la posible solución de medirlos de forma alterna, primero todos los pares y después los impares, no aportaba suficientes ventajas frente a la complicación de operación, y por ello se optó por medir cada piso de forma independiente.



Se comprobó que teniendo un control preciso del tiempo de estabilización de los LED, se podía trabajar con intervalos relativamente cortos (entre 0,2 y 2 segundos) obteniendo una buena repetitividad de medida, a temperatura ambiente. Esto se estimó midiendo varias veces a la misma temperatura, se calculó la media de todos los datos obtenidos, y se obtuvo que la desviación estándar era del orden del 0,2 % de la media.

Por todo lo analizado, la secuencia de medida establecida fue la siguiente: medir piso a piso consecutivamente, primero los de la torre de fotodiodos, y después los de la torre de LED. Empezar con la torre de fotodiodos evita que el calentamiento de los LED afecte a las medidas de la corriente de oscuridad.

Se consideró que sería adecuado dejar algunos parámetros de la secuencia de medida configurables para poder modificarlos durante la explotación y así optimizar el funcionamiento de LDT. De entre todos los parámetros, los que tienen unas implicaciones más directas en la medida son dos: el tiempo de estabilización de los LED, y si la medida se hace con el LED apagado o encendido.

La torre de oscuridad solo tiene la opción de medir con los LED apagados, pues su rango de funcionamiento no permite medir fotocorriente. Sin embargo, la torre de luz puede configurarse para realizar la medida de ambos modos. Esta forma de medir con la torre de luz es útil si la torre de oscuridad llega a saturarse por un exceso de radiación ionizante. Hay que tener en cuenta que la torre de luz es menos sensible y necesita unos flujos muy altos de protones para detectar señal, pero si la torre de fotodiodos satura, se aprovechará la torre de luz para adquirir las señales de ionización.

Durante una activación de LDT se pueden realizar 1, 2 o 3 medidas completas, cada una de ellas con los LED encendidos o apagados. Se estableció que la medida estándar estuviera formada por 3 medidas, en las que la torre de luz se medía dos veces con los LED encendidos y una tercera con los LED apagados.

Dejando un tiempo de estabilización de 500 ms al encender los LED, una medida completa duraba ~ 16 s. Una activación, en la configuración antes descrita, dura 45 s. Y con este periodo de activación se podrían realizar hasta 20 medidas al atravesar la AAS por su parte central.

## 5.5 Descripción final de LDT

La estructura de los apilamientos de LDT fue mostrada en la Fig. 5-3, y la de uno de sus pisos en la Fig. 5-1. En esas figuras se señalaron los apantallamientos que se han descrito a lo largo del desarrollo. En la Tabla 5-10 se resumen los modos de funcionamiento de cada apilamiento, indicando el dispositivo sensible, el tipo de efecto de radiación y el efecto macroscópico observable en el que se basa la determinación de la radiación.

Tabla 5-10. Base del funcionamiento de cada uno de los apilamientos de las torres de LDT.

Apilamiento	Denominación	Efecto	Tipo	Dispositivo sensible	Efecto macroscópico observable	Referencia de temperatura
Torre 1	Torre de luz o torre de LED	DD	Permanente	LED [L9338]	Decaimiento potencia óptica	TMP- 36
		Ionización	Transitorio	Fotodiodo [S5107]	Corriente de ionización	
Torre 2	Torre de oscuridad o torre de fotodiodos	DD	Permanente	Fotodiodo [S5107]	Aumento corriente de oscuridad	
		Ionización	Transitorio	Fotodiodo [S5107]	Corriente de ionización	

En la Fig. 5-12 se muestra una representación del instrumento completo, con la estructura de los apilamientos tumbada longitudinalmente, tapando la electrónica de control que queda debajo. En esta imagen se han dejado algunas partes transparentes para mostrar en el interior, la ubicación de las tarjetas electrónicas y los pisos.

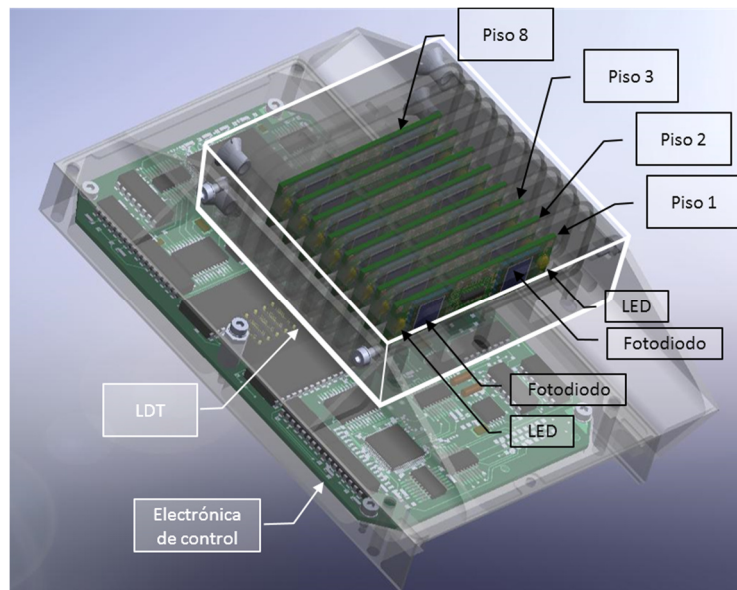


Fig. 5-12. Vista en 3D de la estructura completa de LDT

Con el fin de obtener la medida de la temperatura de los fotodiodos, se incluyó un sensor de temperatura TMP36. Este pequeño dispositivo genera una tensión proporcional a su temperatura. Fue pegado directamente al encapsulado del fotodiodo por la parte de atrás. Para poder hacerlo fue necesario diseñar la tarjeta electrónica, donde el fotodiodo va soldado, con una oquedad para pegarlo justo sobre el propio fotodiodo. En la Fig. 5-13 se muestra una foto del detalle de la trasera de la tarjeta donde el sensor térmico TMP36 va alojado. Se muestra también la vista frontal y trasera de la tarjeta de un piso y la estructura de aluminio, con la PCB en su interior, de un piso del modelo de calificación (QM).

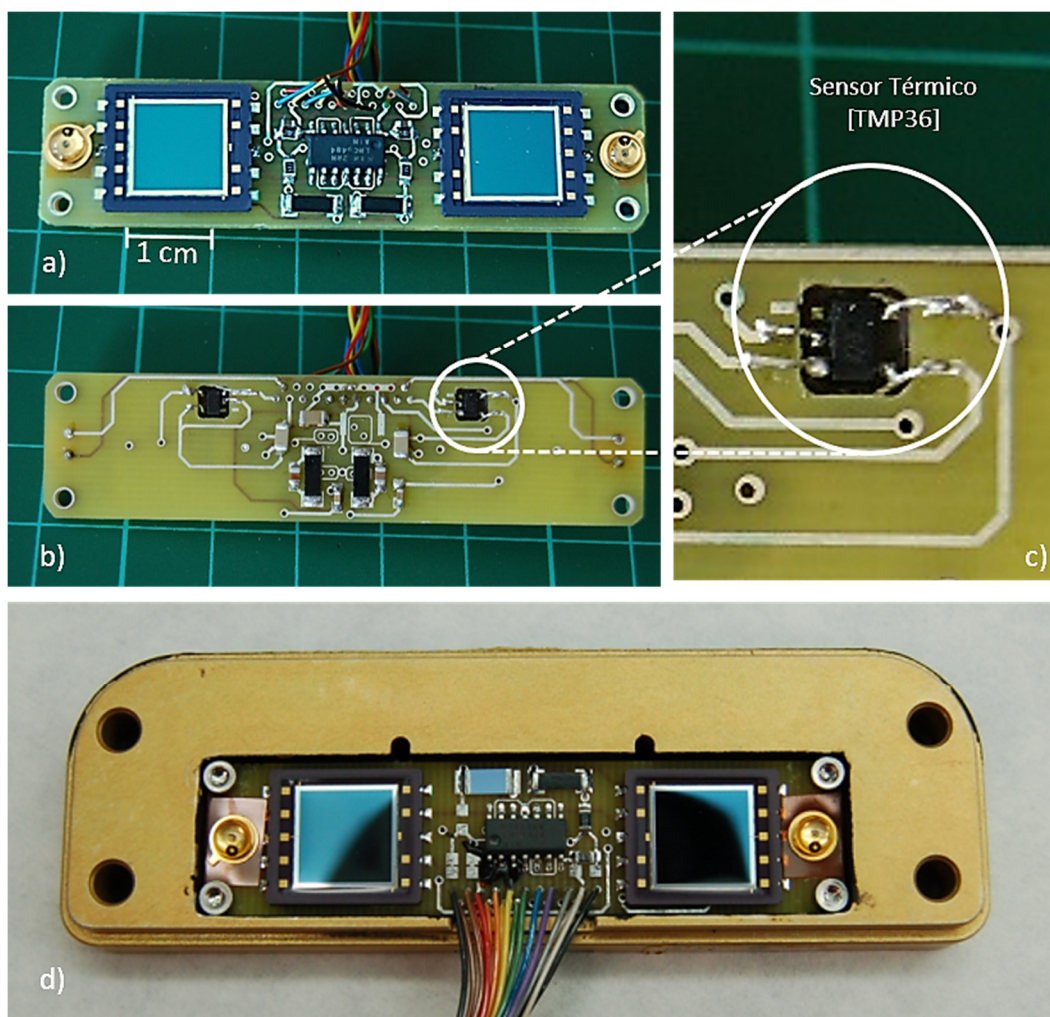


Fig. 5-13. Detalles de la tarjeta electrónica de los pisos de LDT: a) Imagen delantera; b) Imagen trasera; c) Detalle del sensor térmico embutido en la PCB y en contacto directo con el fotodiodo; d) Uno de los pisos del modelo de calificación (QM)



En la Fig. 5-14 se muestran tres fotografías correspondientes a la cara superior de la tarjeta de adquisición y control del experimento (TOP), la parte de abajo (BOTTOM), y la misma tarjeta, momentos antes del cierre del instrumento, dentro de la estructura de LDT (c).

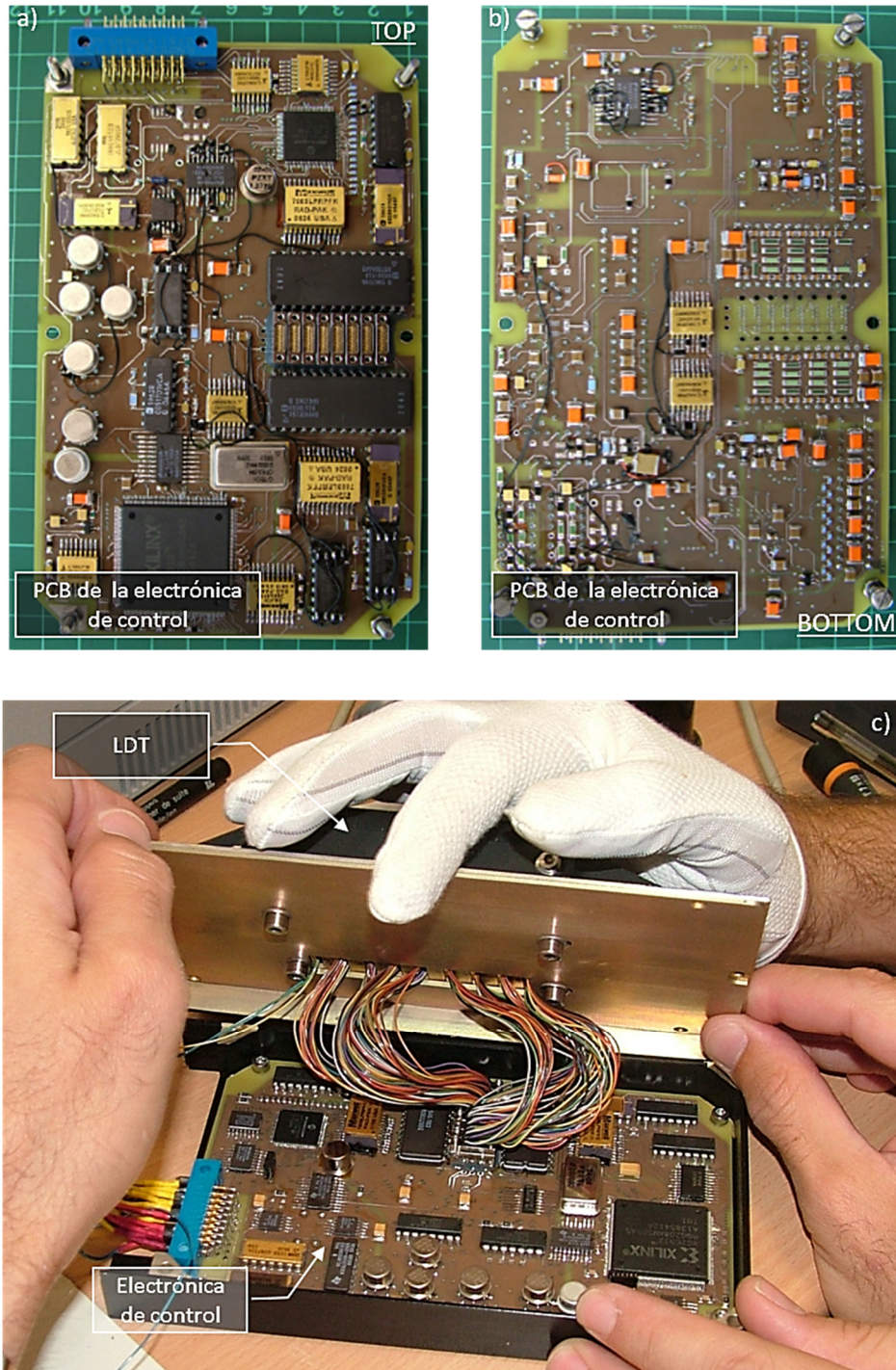


Fig. 5-14. Detalles de la tarjeta electrónica de control y adquisición de LDT: a) Imagen delantera; b) Imagen trasera; c) Momento en el que se procedía a cerrar el modelo QM

Las características conseguidas en LDT se muestran en la hoja de especificaciones de la Tabla 5-11.

Tabla 5-11. Hoja de características de LDT

Característica	Valor	Unidades	observaciones
<b>Torre de LED</b>			
Rango dinámico	0 – 3,3	μA	Cumple con el requisito establecido
Variación esperada semanal	-110	pA	
Tiempo de vida <sup>1</sup>	600	Años	Cumple el mínimo de 2 años de misión
Resolución	880	fA	El requisito era de 110 fA. Se pierde la opción de la reconstrucción de espectros
<b>Torre de fotodiodos</b>			
Rango dinámico	0 – 6,6	nA	Dato inferior al requisito establecido (80 nA). En caso de saturación, la torre de LED se hará cargo de las medidas
Variación esperada semanal	12	pA	
Tiempo de vida <sup>1</sup>	9	Años	Cumple el mínimo de 2 años de misión
Resolución	1	fA	Cumple el requisito
<b>Instrumento LDT</b>			
Masa total	1,16	kg	
Dimensiones	180 x 130 x 56	mm	Largo × Ancho × Alto
Alimentación	+12, -12 y +5	V	
Potencia eléctrica total	1,56	W	
Rango Térmico	-20 – 50	°C	En operación
Resolución Temperatura	0,015	°C	
Alimentación de los LED	2	mA	
Polarización de los fotodiodo	-12	V	
Altura del LED al Techo	0,5	mm	Se habían realizado la mayoría de cálculos con un techo de 0,7mm. Esta desviación no supone un problema
Escudo de Al entre pisos	0,5	mm	Ajustes de energías umbral
Escudo de Al trasero <sup>2</sup>	12,4	mm	Ajuste de energía trasera
Escudo de Al superior <sup>2</sup>	11,5	mm	Ajuste de energía lateral
Escudo de Al derecho <sup>2</sup>	11	mm	Ajuste de energía lateral
Escudo de Al Izquierd <sup>2</sup>	11	mm	Ajuste de energía lateral
Escudo de Al delantero <sup>2</sup>	15,7	mm	Para proteger la electrónica de los pisos

*Nota 1: El tiempo de vida se calcula en base a dividir el rango entre la variación esperada por semana.*

*Nota 2: La identificación de cada uno de los escudos se muestra en la Fig. 5-1 y Fig. 5-3*

La imagen de la Fig. 5-15 muestra el modelo FM de las dos torres terminado y cerrado. En esta misma imagen se muestra también un detalle de las aberturas frontales que dejan al descubierto tanto el LED (L9338), que aparece como un reflejo dorado en el interior de la cavidad, como el fotodiodo (S5107), que se muestra como una superficie con un reflejo uniforme.

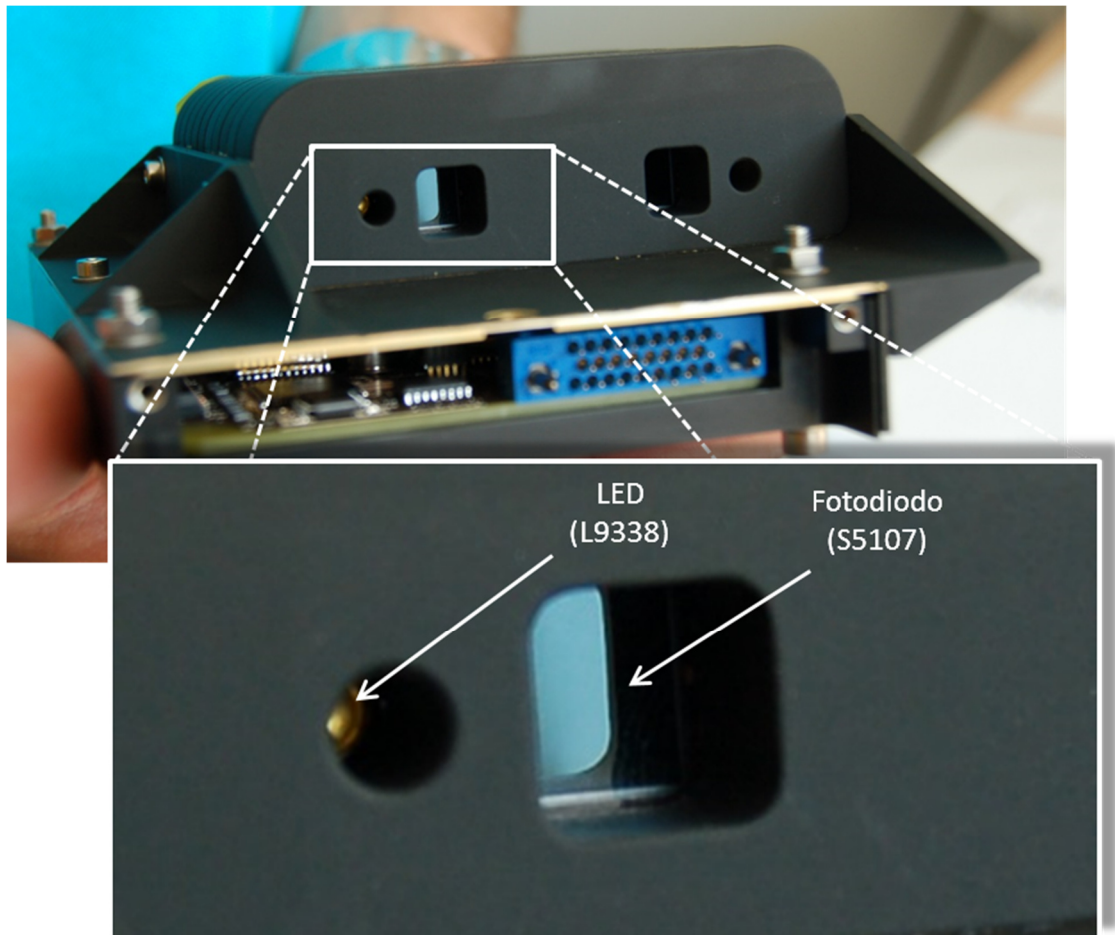


Fig. 5-15. Imagen del modelo FM de LDT

Con la intención de completar la descripción del instrumento, se han incluido en el apéndice B, un esquema de bloques del diseño electrónico y los planos de fabricación de la mecánica de la estructura.



## 6 Calibración de LDT

*El instrumento LDT ha necesitado tres tipos de calibraciones: calibración de los DD para determinar la fluencia, de los efectos de ionización para determinar el flujo, y de los efectos térmicos sobre las señales para corregir sus dependencias con la temperatura. Se describe el procediendo de calibración, se muestran y discuten los resultados, y se concluye que será necesario realizar una calibración térmica de forma periódica durante la explotación en órbita.*

*Especial atención requerirán también los temas relacionados con las energías umbrales frontales, laterales y traseras para identificar que piso está apantallado de forma homogénea.*



## 6.1 Introducción

Las magnitudes en las que se basa la calibración de LDT dependen de los efectos macroscópicos que la radiación produce sobre los elementos sensores, estos efectos son de dos tipos, acumulativos por la fluencia de protones y los transitorios proporcionales al flujo instantáneo.

- **La fluencia de protones** se determina en base a que los efectos de DD son proporcionales, en función de su NIEL [Vas00a], a la fluencia de protones, y a que estos DD pueden ser medidos directamente con los
  - **Fotodiodos**, pues el aumento de la corriente de oscuridad es proporcional a los DD, y con los
  - **LED**, en donde la pérdida de potencia óptica es proporcional a los DD.
- **El flujo de protones** se determina gracias a que los protones tienen poder de ionización y generan pares electrón-hueco en los semiconductores produciendo una corriente en los
  - **Fotodiodos** que es proporcional al ritmo de ionización (“*Dose Rate*”) y este, por medio del LET, es proporcional al flujo de protones.

La calibración persigue determinar los elementos de las matrices del sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de LDT (Capítulo 2). Tal y como se indicó se tienen 3 modos de trabajo, cada uno de ellos caracterizado por una matriz: una basada en los DD de los fotodiodos, otra en los DD de los LED, y una tercera basada en los efectos transitorios que la ionización provoca en los fotodiodos. Tal y como se vio en §2.1.2.4 LDT sufren efectos por los protones que inciden desde cualquier dirección. Pero aquí, como primera aproximación, solo se han obtenido los parámetros frontales para obtener la matriz de daño frontal.

Se realizaron dos calibraciones frontales, una para calibrar los DD en función de la fluencia de protones, y la otra para la calibración de la señal de ionización en función del flujo.

Previamente se realizó un ensayo para determinar que energías, de las que proporciona el acelerador, eran las más parecidas a las energías umbrales de cada piso

para conseguir que las matrices que se obtuvieran, después durante la calibración, cumplieran la condición de triangularidad descrita en el apartado §2.1.2.3.

La búsqueda de las energías umbrales se realizó usando el modelo QM de LDT. Posteriormente, para entrenar el procedimiento y no poner en peligro la integridad del FM se realizó también un simulacro de la calibración usando este mismo QM. En este se ensayó la forma de cambiar las energías del haz, la forma de modificar los flujos, y se evaluaron las señales obtenidas para ajustar, a la baja, la dosis total que se usaría durante la calibración del FM. Se quería que una vez se pusiera el modelo FM delante del haz de protones, nada fuera improvisado: ni el número de pasos, ni la intensidad de los mismos, ni el modo de realizar los cambios de configuración del haz. El objetivo perseguido era también que todos los miembros del equipo adquirieran destreza, seguridad y velocidad en la ejecución de todas las maniobras.

Ambos ensayos, sobre el QM y sobre el FM, se realizaron durante la misma campaña de irradiación en un total 45 horas repartidas en 3 días entre el montaje, puesta a punto, ejecución y pre-análisis.

Una vez se verificó que el modelo FM de LDT funcionaba correctamente en vuelo, se decidió realizar una calibración lateral, usando el modelo QM, para determinar las energías umbrales laterales y traseras.

La Tabla 6-1 muestra las fechas, actuaciones y duración de cada una de las calibraciones aquí mencionadas, también se indican parámetros de la radiación recibida en cada uno de los ensayos. Se ha diferenciado la dosis recibida en el interior y en el exterior del instrumento para evaluar la radiación total acumulada en cualquier parte del mismo, esta dosis se ha expresado como una *dosis de ionización* (TID) y como una *dosis de daños por desplazamiento* (TNID):

- ***La dosis acumulada en el interior*** está calculada para la profundidad en aluminio en la cual los protones son frenados hasta una energía de 10 MeV. Esta profundidad depende de la energía, y no es la misma en todos los pasos de irradiación, por lo que en realidad, ninguna parte del instrumento ha recibido tanta dosis como se muestra en la Tabla. Este valor siempre será mayor que el real y sirve como una cota superior de dosis total acumulada recibida en cualquier parte del instrumento.

- **La dosis acumulada en el exterior** sería la dosis acumulada por elementos que estuvieran toda la irradiación expuestos sin ningún apantallamiento. La dosis acumulada en el interior se ha definido de tal forma que es una cota superior de la dosis recibida en LDT, pero esta dosis externa no es la dosis mínima, ciertas partes de LDT recibirán dosis de radiación menores ya que no todas las energías penetran hasta todos los puntos. Esta dosis es una referencia del valor que acumula la electrónica de control de LDT, que tiene poco apantallamiento.

Tabla 6-1. Detalles de los ensayos de calibración de LDT realizados en el PIF del PSI en Suiza

	Fecha Tiempo de haz	Tipo de calibración	Modelo de LDT utilizado	TNID ( $\Phi$ eq. p+ 10 MeV)		TID	
				Exterior <sup>1</sup> [cm <sup>-2</sup> ]	Interior <sup>2</sup> [cm <sup>-2</sup> ]	Exterior <sup>1</sup> [rad]	Interior <sup>2</sup> [rad]
1ª campaña de calibración	04-10-2008 4,4 h	Energías umbral frontal	QM	$1,44 \cdot 10^7$	$3,08 \cdot 10^7$	5,8	16,9
	04-10-2008 3,9h	<i>Simulación de Calibración</i>	QM	$3,75 \cdot 10^8$	$9,25 \cdot 10^8$	140,5	508,7
	05-10-2008 3,1 h	Flujo	FM	$1,05 \cdot 10^8$	$2,00 \cdot 10^8$	44,8	110,0
	05-10-2008 1,1 h	DD	FM	$5,94 \cdot 10^7$	$1,21 \cdot 10^8$	24,4	66,7
2ª campaña de calibración	07-05-2010 7 h	Energías umbral laterales y traseras	QM	--	--	--	--

*Nota 1:* dosis acumulada en una zona expuesta sin apantallamiento.

*Nota 2:* dosis acumulada en una hipotética zona que estuviera expuesta siempre con un apantallamiento tal que los protones lleguen frenados con una energía de 10 MeV.

Posteriormente se realizó una caracterización térmica de las respuestas de los elementos sensores a la radiación del modelo FM de LDT, monitorizando las corrientes de oscuridad y las fotocorrientes producidas por los LED de cada piso, en función de la señal que proporcionan los TMP-36 de cada uno de los pisos.

En este capítulo se van a mostrar los resultados de todas estas calibraciones, empezando por la determinación de las energías umbrales (§6.2), después la calibración de la respuesta de LDT a la radiación (§6.3), y por último la calibración térmica de la respuesta de LDT que incluye además la evaluación del funcionamiento de los sensores de temperatura TMP36 en ambiente de radiación (§6.4).

## 6.2 Determinación de las energías umbrales

Se empezará recordando el concepto de energía umbral y como aplicarlo sobre la energía de un haz de protones de un acelerador.

La energía umbral de un piso es la mínima energía que debe de tener un protón para que alcance un piso sin haber sido frenado previamente por el blindaje externo. Para obtener la matriz del sistema y que esta sea triangular es necesario realizar la calibración con las energías umbrales de los pisos de LDT, pero como la energía umbral es un concepto teórico que aplica cuando los haces de protones incidentes son mono-energéticos, en realidad lo que se hace es identificar cuáles de las energías disponibles se comportan de forma más parecida a lo que cabría esperar si se irradiara con  $p^+$  de una verdadera energía umbral. El modo de proceder es ir probando de una en una todas las energías disponibles en el acelerador, empezando por la energía más baja, a la vez que se monitorizan las señales de los pisos y sus sensores de temperatura. Cuando la señal de un piso es máxima, y el siguiente piso no se ve afectado, se consideraba que la energía de ese haz corresponde a la energía umbral de ese piso.

Este proceso se tiene que hacer para cada ángulo de incidencia que se quisiera estudiar. En el caso de LDT se contemplaron un total de 14 ángulos de incidencia incluyendo la incidencia frontal y la incidencia trasera. En cada caso el modo de fijación y alineamiento fue ligeramente diferente. Los detalles del montaje experimental se pueden encontrar en §3.3.4.

**Selección de ángulos de incidencia:** los 14 ángulos de incidencia de protones se han dividido en dos grupos, el grupo denominado *horizontal* y el *vertical*. Todos estos vectores son identificados en la Fig. 6-1 para las incidencias relativas a los giros horizontales (con flechas rojas) y en la Fig. 6-2 para las verticales (con flechas negras).

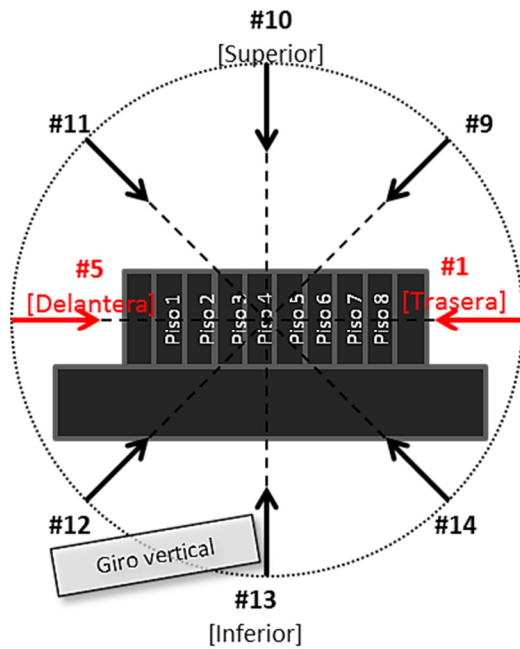
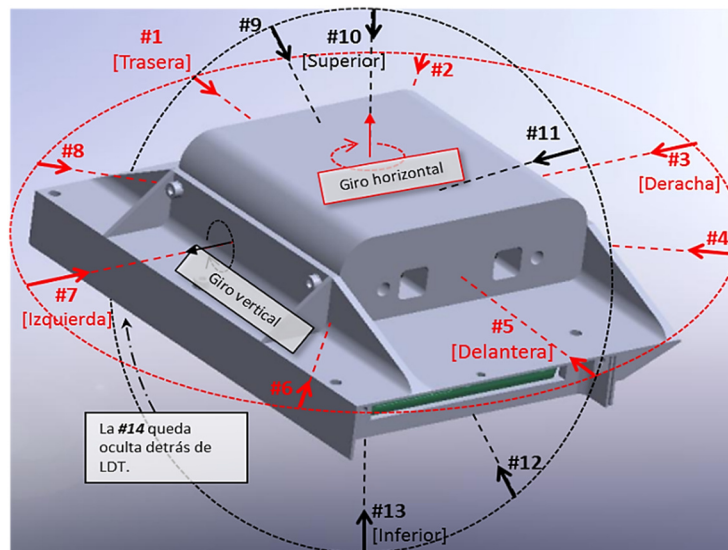


Fig. 6-2. Vista lateral de las direcciones y sentidos de irradiación de LDT



Todos los vectores de irradiación están enumerados e identificados en la tabla 6-2.

Tabla 6-2 Descripción de la incidencia de irradiación de los 14 vectores seleccionados para irradiar lateralmente

Vector de Irradiación	Incidencia	Tipo de giro
#1	Trasera	Horizontal
#2	Oblicua lado derecho trasero	Horizontal
#3	Derecha	Horizontal
#4	Oblicua lado derecho frontal	Horizontal
#5	Frontal	Horizontal
#6	Oblicua lado izquierdo frontal	Horizontal
#7	Izquierda	Horizontal
#8	Oblicua lado izquierdo trasero	Horizontal
#9	Oblicua Superior trasera	Vertical
#10	Superior	Vertical
#11	Oblicua superior delantera	Vertical
#12	Oblicua inferior delantera	Vertical
#13	Inferior	Vertical
#14	Oblicua inferior trasera	Vertical

### 6.2.1 Energías umbrales obtenidas

#### A. Energías frontales

Durante la primera campaña de calibración (Tabla 6-1) se ejecutó la determinación de las energías umbrales frontales de LDT, para preservar el FM se utilizó el modelo de calificación (QM). El resultado obtenido se presenta en la Tabla 6-3, en donde se recogen:

- **La energía umbral frontal** de cada piso, que en realidad es la energía de irradiación del acelerador que cumple las condiciones de energía umbral ya descritas. Este dato se obtuvo para todos los pisos en la primera campaña de

calibración, y para 4 de ellos durante la verificación frontal realizada en la segunda campaña de calibración (tabla 6-1). Se comprueba que ambos son iguales.

- **Anchura espectral** a media altura del haz de irradiación en esas condiciones.
- **La energía primaria** del acelerador.
- **El espesor del degradador de cobre** utilizado.

Tabla 6-3. Energías umbrales frontales obtenidas durante la primera (2008) y segunda (2010) campaña de calibración realizada sobre del modelo QM

Piso	Energía umbral frontal en 2008 [MeV]	Energía umbral frontal en 2010 [MeV]	Anchura a media altura [MeV]	Energía primaria del acelerador [MeV]	Espesor del degradador de Cu de la salida del acelerador [mm]
Piso 1	10,67	-	-	-	-
Piso 2	28,78	28,78	2,08	98,90	11,50
Piso 3	40,90	-	-	-	-
Piso 4	50,41	50,41	1,38	98,90	9,00
Piso 5	58,74	-	-	-	-
Piso 6	63,54	63,54	1,08	98,90	7,00
Piso 7	70,67	-	-	-	-
Piso 8	80,10	80,10	0,61	98,90	4,00

*Nota: Algunos datos no fueron registrados durante, y no han podido ser incluidos.*

## B. Energías traseras

La tabla 6-4 muestra las características del haz de irradiación durante el ensayo de la determinación de las energías umbrales al irradiar desde atrás. En la Fig. 6-4 se mostrarán estos mismos valores junto con los obtenidos frontalmente.

Tabla 6-4. Energías umbrales traseras obtenidas durante la segunda campaña de calibración (2010) realizada sobre del modelo QM

Piso	Energía umbral Trasera [MeV]	Anchura a media altura [MeV]	Energía primaria del acelerador [MeV]	Espesor del degradador de cobre de la salida del acelerador [mm]
Piso 1	104,21	1,83	150,10	12,50
Piso 2	96,70	0,20	98,90	0,50
Piso 3	92,18	0,35	98,90	1,50
Piso 4	87,49	0,49	98,90	2,50
Piso 5	82,62	0,57	98,90	3,50
Piso 6	74,80	0,75	98,90	5,00
Piso 7	69,38	0,94	98,90	6,00
Piso 8	63,54	1,08	98,90	7,00

Para poder determinar la energía umbral trasera del piso 1, de 104,21 MeV, fue necesario aumentar la energía primaria del acelerador hasta 150 MeV, con ello también se necesitó usar un degradador de Cu de 12,50 mm de espesor.

Las energías umbrales frontales y traseras por piso han sido representadas en la Fig. 6-4. Se observa la evolución ascendente de las energías umbrales frontales, y la descendente de las traseras. El punto de cruce de ambas tendencias está situado en el piso 7. Es decir, este tiene igual apantallamiento por delante que por detrás (fue así diseñado expreso §5.2.2).

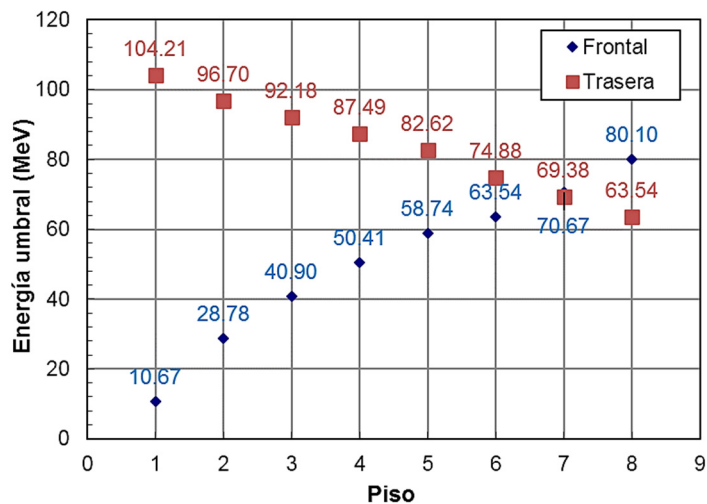


Fig. 6-4. Representación de las energías umbrales trasera y delantera en función del piso de LDT. Nótese que coinciden en el piso 7



### C. Energías laterales

La energía umbral bajo incidencia lateral es prácticamente la misma para todos los pisos ya que el espesor del blindaje lateral es igual para todos ellos. Solo en algunos casos se dio la situación de un comportamiento diferente entre los pisos de la parte frontal del apilamiento y los de la parte trasera.

La Tabla 6-5 muestra las energías umbrales laterales encontradas en el modelo QM durante la segunda irradiación de calibración (2010). Se muestra el resultado de las 12 direcciones de irradiación laterales. Estas energías umbrales afectaron a todos los pisos de la misma forma, excepto en las direcciones de irradiación #3 y #8, en las que se han encontrado dos valores, uno que afecta a los pisos del 3 al 8 y otra que afecta al 1 y el 2.

Tabla 6-5. Energías umbrales laterales obtenidas durante la irradiación del 07-05-2010 realizada sobre del modelo QM

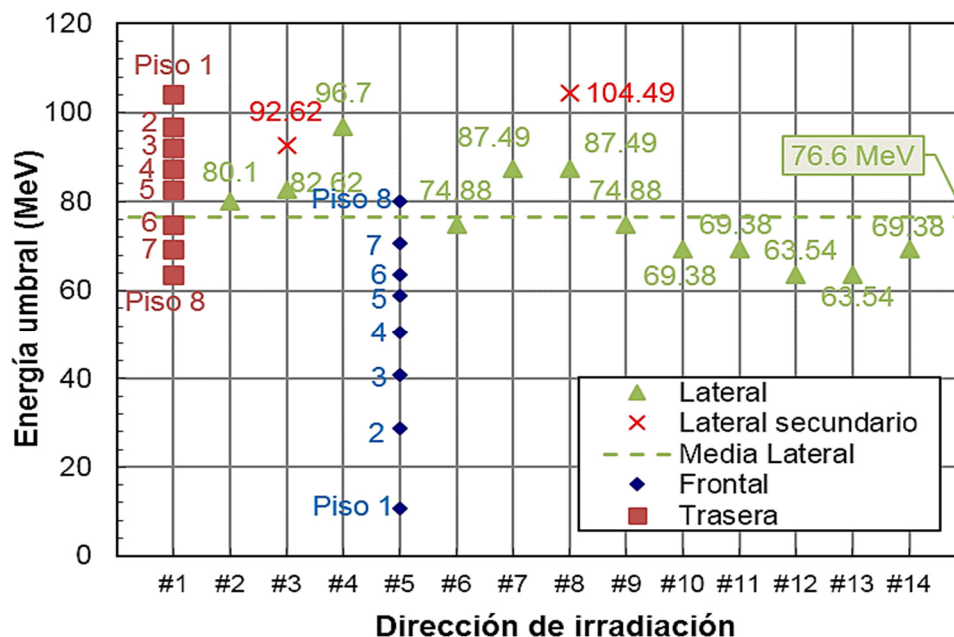
Dirección de irradiación	Piso afectados	Energía umbral [MeV]	Anchura a media altura [MeV]	Energía primaria del acelerador [MeV]	Espesor del degradador de cobre de la salida del acelerador [mm]
#2	Todos	80,10	0,61	98,90	4,00
#3	3 – 8	82,62	0,57	98,90	3,50
	1 y 2	92,18	0,35	98,90	1,50
#4	Todos	96,70	0,20	98,90	0,50
#6	Todos	74,88	0,75	98,90	5,00
#7	Todos	87,49	0,57	98,90	2,50
#8	3 – 8	87,49	0,57	98,90	2,50
	1 y 2	104,49	1,83	150,10	12,50
#9	Todos	74,80	0,75	98,90	5,00
#10	Todos	69,38	0,94	98,90	6,00
#11	Todos	69,38	0,94	98,90	6,00
#12	Todos	63,54	1,08	98,90	7,00
#13	Todos	63,54	1,08	98,90	7,00
#14	Todos	69,38	0,94	98,90	6,00

Hay que señalar que fue difícil determinar las energías umbrales laterales, y el error en su determinación se ha estimado en 10 MeV. En algunas ocasiones no se podía distinguir cual era la energía umbral entre dos o tres de la lista de energías probadas porque daban resultados similares. Habría ayudado tener un sensor de radiación justo detrás del piso para determinar cuándo lo traspasaba la radiación, al igual que sucedía en la radiación frontal, o en la trasera, en las que el piso que estaba detrás del que estaba siendo calibrado tenía esta función.

## 6.2.2 Conclusiones e Implicaciones

Se ha calculado la media de las energías umbrales laterales del piso 7 obteniendo un valor de 76,6 MeV que es similar al que tiene este mismo piso tanto por delante como por detrás (~70 MeV). Esto permite asumir, en primera aproximación, que **el piso 7 tiene un apantallamiento isotrópico**. Este apantallamiento pseudo-isotrópico se evalúa calculando la media de todos los valores obtenidos, dando como resultado ~75 MeV. Este piso se podrá usar como una **referencia omnidireccional de la radiación** incidente de protones superiores a 75 MeV y tratar los datos medidos en él como se describió en § 2.1.2.2.

La Fig. 6-5 representa las energías umbrales para todas las direcciones de irradiación, incluyendo la frontal (#5) y la trasera (#1). Se representan las energías laterales y una línea horizontal marcando la media que afecta al piso 7.



*Nota: Las energías laterales secundarias se refieren a las que afectan únicamente a los pisos 1 y 2.*

Fig. 6-5. Representación de las energías umbrales laterales, trasera (#1) y delantera (#5) en función de la dirección de irradiación

Todos estos resultados son extrapolables al modelo de vuelo, pues ambos modelos son idénticos. En esta estructura, los espesores de los apantallamientos intermedios, laterales y traseros son lo que más condicionan la energía umbral. Las mínimas variaciones de espesores entre un modelo y el otro, debido a las tolerancias de fabricación ( $\sim\mu\text{m}$ ), son despreciables a estos efectos.

### **6.3 Determinación de la sensibilidad a la radiación**

En esta sección se detallan y discuten los resultados obtenidos durante los ensayos de calibración del modelo FM de LDT. Se ha dividido en tres apartados. En el primero (§6.3.1) se describe el tratamiento de datos explicando las correcciones y cálculos realizados para obtener los parámetros de la calibración; también se presenta cómo se van a mostrar y representar los datos obtenidos. En el segundo apartado (§6.3.2) se muestran y discuten los resultados de la respuesta de LDT a la fluencia (efectos de DD). El último (§6.3.3) se dedica a la calibración de la respuesta al flujo (efectos de ionización).

Previamente a la calibración del modelo FM se procedió a realizar el simulacro de la calibración con el modelo QM. El procedimiento fue el mismo que luego se ejecutó con el modelo FM, a excepción de que las fluencias irradiadas en cada paso fueron mayores. Este simulacro perseguía cuatro objetivos:

- Ver las posibilidades reales que ofrecía el acelerador de protones.
- Aprender y entrenar el procediendo de calibración, especialmente el de configuración y manejo del acelerador de protones.
- Identificar problemas de ejecución.
- Determinar los valores mínimos y suficientes del flujo y de la fluencia para realizar la calibración del modelo FM a la dosis más baja posible.

Tras el montaje y alineamiento (§3.3.4) se ejecutó el ensayo de calibración de los efectos de DD acumulados (calibración de la fluencia) y posteriormente la calibración de los efectos transitorios de ionización (calibración del flujo).

Para la ejecución de estos ensayos, LDT registró de forma continua las señales de todos sus sensores (incluyendo los de temperatura). El haz de protones se activaba y desactivaba de forma alterna cambiando sus parámetros para conseguir pasos de irradiación de diferentes flujos y fluencias usando las energías umbrales de cada piso. En

el apéndice “A. *Procedimiento de calibración de LDT*” se describe paso a paso el procedimiento seguido y los valores de flujos, fluencias y energías usadas.

### 6.3.1 Tratamiento de datos y representación de resultados

En este apartado se va a describir las correcciones aplicadas sobre los datos medidos y los cálculos realizados para obtener los parámetros de la calibración. También se describe el modo que se ha establecido para representar la información obtenida.

Los DD se obtuvieron de la variación de las señales antes y después de cada paso de irradiación (midiendo con el haz apagado). La sensibilidad al flujo (ionización directa) se determinó comparando la señal durante pasos de irradiación realizados a diferentes flujos mayores que cero (midiendo con el haz encendido) y a flujo cero (con el haz apagado). Así pues, el primer paso del tratamiento de datos fue separar las medidas en dos grupos, las que fueron tomadas con el acelerador encendido, y las que fueron tomadas con el acelerador apagado.

Se evaluaron las repuestas de todos los sensores de LDT, ya no solo la degradación de la emisión de los LED y las señales de oscuridad o ionización de los fotodiodos, sino que también se evaluó la respuesta, y la degradación, de los sensores de temperatura (TMP36). Este sensor es la referencia de temperatura de cada piso y se usa para corregir las señales de los fotodiodos. Si su degradación fuera apreciable no se podría corregir las señales y la incertidumbre de medida aumentaría.

En todos los casos, se ha calculado la pendiente de la recta que relaciona la magnitud elegida (fotocorriente, corriente de oscuridad, corriente de ionización o valor de la temperatura) en función de la fluencia o el flujo. Se presentarán los datos de estas pendientes, así como su error estadístico expresado en valor absoluto y en porcentaje, y el coeficiente de correlación lineal  $r^2$ .

Es importante destacar que previamente a la realización del ajuste, se realizó la corrección de la uniformidad del haz. No fue necesario aplicar corrección térmica alguna pues se verificó que la variación de la temperatura del búnker de irradiación era despreciable. En el caso de la calibración de los DD de la torre de LED se obtuvieron unos resultados con incertidumbres mayores que en el resto de casos. Por eso se probó a aplicar la corrección térmica, y verificar si el resultado mejoraba. La aplicación de la corrección térmica no produjo ningún cambio en la respuesta, y quedó demostrado que no hacía falta aplicar corrección térmicas durante la calibración.

### A. Corrección de la uniformidad del haz

El haz de protones utilizado tenía una sección circular de unos 9 cm de diámetro en el plano de trabajo. Al alejarse de este plano el diámetro era algo mayor debido a la divergencia del haz. El flujo en el plano de irradiación no era uniforme ni vertical ni horizontalmente como ya vimos en la Fig. 3-4. Para evitar que la radiación que le llega a cada apilamiento de LDT fuera diferente se centró el instrumento de tal forma que cada apilamiento quedaba a la misma distancia del centro del haz. Pero existía otra dependencia espacial, la divergencia del haz que provocaba que la intensidad de radiación disminuya con la distancia a la boca del cañón de protones. Por este motivo, los pisos delanteros, que estaban más cerca de la salida del haz, estaban sometidos a mayor radiación que los traseros. Esta dependencia con la distancia a la salida del cañón de protones tuvo también que ser corregida. Si el haz del acelerador fuera colimado no sería necesario realizar esta corrección. Es decir, la corrección que aplicamos es algo intrínseco a las características del haz, y no se pretende corregir el frenado que sufre la radiación al ir atravesando la estructura de LDT.

Para obtener estos parámetros de corrección fue necesario realizar lo que se ha llamado “ensayo de corrección en profundidad del haz”, el cual ha proporcionado unos factores para calcular la radiación recibida en cada uno de los pisos de LDT. Todos ellos se muestran en la Tabla 6-6 donde se ha añadido una escala cromática para identificar los valores más altos (rojo), los más bajos (verde) y los intermedios (naranjas, amarillos y verdes claros).

Tabla 6-6. Factores de corrección de la homogeneidad del haz

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,9295	0,9324	0,9343	0,9358	0,9371	0,9379	0,9390	0,9405	1,00
Piso 2	0,8882	0,8928	0,8958	0,8982	0,9003	0,9015	0,9033	0,9056	0,91
Piso 3	0,8468	0,8532	0,8574	0,8606	0,8634	0,8651	0,8676	0,8707	0,82
Piso 4	0,8055	0,8137	0,8189	0,8230	0,8266	0,8287	0,8319	0,8358	0,73
Piso 5	0,7642	0,7741	0,7804	0,7854	0,7898	0,7923	0,7962	0,8010	0,64
Piso 6	0,7229	0,7345	0,7419	0,7478	0,7529	0,7559	0,7605	0,7661	
Piso 7	0,6816	0,6949	0,7035	0,7102	0,7161	0,7195	0,7247	0,7312	
Piso 8	0,6403	0,6553	0,6650	0,6726	0,6793	0,6831	0,6890	0,6963	

Estos mismos datos han sido representados en la Fig. 6-6, en ella se puede ver, de forma más clara, la dependencia con la distancia a la boca del cañón y con la energía. Se ve como las energías bajas decaen más rápidamente con la distancia (el piso 8 está más lejos de la salida del cañón que el piso 1), pues para conseguir esas energías los protones tienen que atravesar un degradador de cobre más grueso, con lo que el haz la divergencia del haz aumenta.

Aplicar estos factores de corrección es como haber irradiado con un haz colimado, en el cual el flujo no depende de la distancia al cañón de protones.

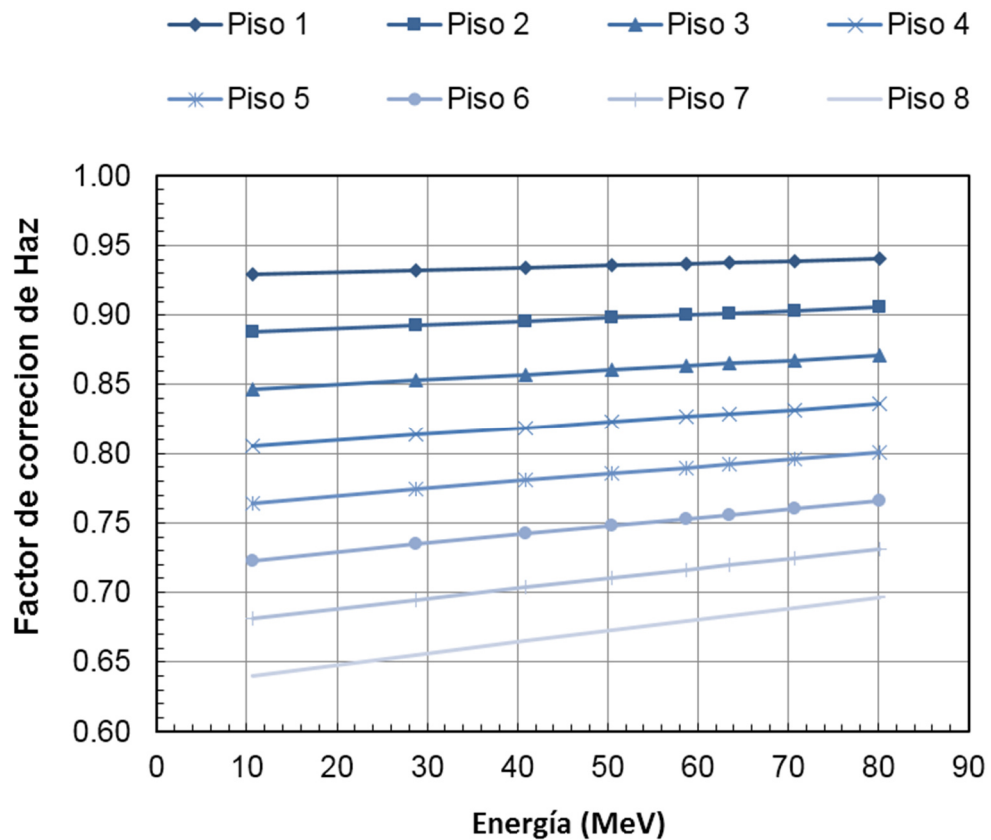


Fig. 6-6. Factores de corrección de la homogeneidad del haz

### B. Cálculo de resultados – Ajuste lineal

El objetivo de la calibración es relacionar el efecto observable que se mide en los sensores de LDT, con la fluencia o el flujo de protones, según el caso. Esta relación se ha visto que se puede aproximar bien a una línea recta, y utilizar la pendiente de esta recta como factor de daño que relaciona la fluencia, o el flujo, con el efecto observable.

A modo de ejemplo, se muestra en la Fig. 6-7 la evolución de la corriente de oscuridad en función de la fluencia de protones de 10 MeV, sobre el piso 1 de la torre de oscuridad de LDT y su ajuste lineal.

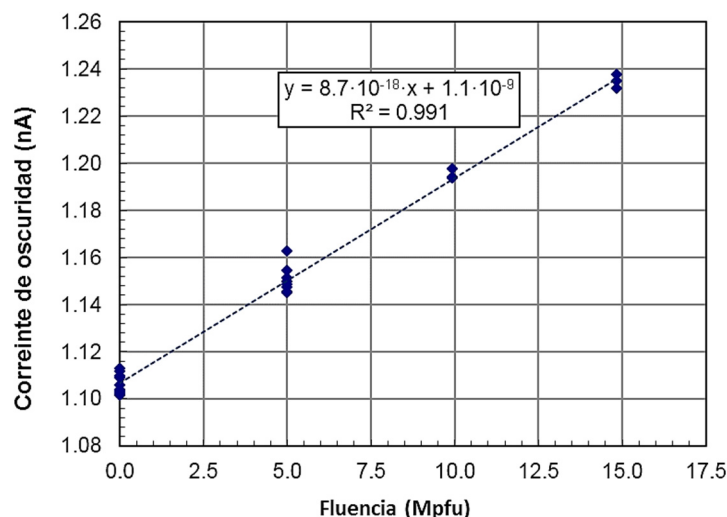


Fig. 6-7. Evolución de la corriente de oscuridad del piso 1 de LDT en función de una fluencia de protones de su energía umbral

De estas regresiones lineales se obtendrán los datos de la pendiente, su error y el coeficiente  $r^2$ . El ejemplo anterior representa un caso en el que hay una dependencia clara de la señal (en ese caso la corriente de oscuridad) con la fluencia. No todos los ajustes realizados han tenido pendientes distintas de cero, ni tan siquiera han tenido una dependencia lineal. Entre los varios motivos que alejan el comportamiento del lineal esperado se encuentran los siguientes:

- Baja relación señal/ruido (Fig. 6-8).
- La sensibilidad a la radiación del dispositivo es despreciable, como el caso de los TMP-36 (Fig. 6-9).
- Irradiar con una energía inferior a la energía umbral no produce ningún efecto.

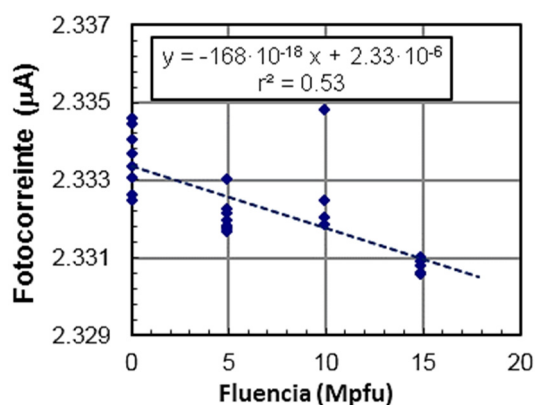


Fig. 6-8. Ajuste lineal de la fotocorriente generada en el piso 1 en función de la fluencia de protones de 50,41 MeV

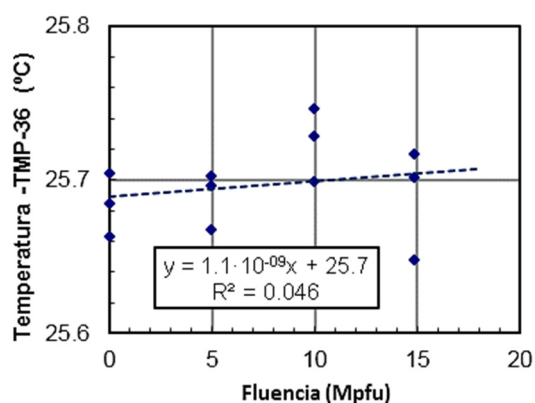


Fig. 6-9. Ajuste lineal de la señal del TMP36 del piso 1 de la torre 2 en función de la fluencia de protones de 10,67 MeV

### C. Representación de resultados

Para representar los parámetros se empleará una representación cromática similar a la mencionada anteriormente: colores rojos para los valores más altos, colores verdes oscuros para los valores más bajo, y verdes claros, amarillos y anaranjados para los valores intermedios. En el caso de representar las pendientes de los ajustes lineales, representan las matrices del sistema, en las que se distinguen dos clases:

- **Matrices de los daños por desplazamiento** cuando contienen información de la dependencia con la fluencia de protones.
- **Matrices de la sensibilidad a la ionización** cuando muestran la dependencia con el flujo.

Si tomamos como ejemplo una matriz de factores de daño cada elemento sería el factor de daño de un piso al ser irradiado con una energía determinada. En la Fig. 6-10 se muestra un ejemplo típico de una matriz “casi triangular” en la que casi todos los elementos por debajo de la diagonal principal son cero. Esta matriz tiene 4 zonas o tipos de elementos:

- **Elementos de la diagonal.** Corresponden a los factores de daño de pisos irradiados justo con su energía umbral, están enmarcados en negro y escritos en negrita.
- **Elementos del triángulo superior.** Corresponden a pisos que están siendo irradiados con energías superiores a su energía umbral.
- **Elementos del triángulo inferior.** Son los datos de los pisos irradiados con energías inferiores a su energía umbral, por lo que no deberían de recibir protones y por ello han de ser cero, en la práctica se verá que son valores despreciables.
- **Elementos de transición.** Son elementos del triángulo inferior pegados a la diagonal que tienen un valor no despreciable, aunque cercano a cero. Se producen porque el haz no es mono-energético, y algunos protones pueden tener una energía superior a la energía umbral del término de la diagonal, por lo que consiguen alcanzar el siguiente piso y producir un efecto en él. Se ha encontrado que estos términos de transición aparecen incluso en dos términos consecutivos. Los términos de transición serán enmarcados en blanco y escritos con letras blancas, la matriz del ejemplo posee seis.



PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	8,74	5,52	4,86	3,83	3,69	3,49	3,30	3,32	8,7
Piso 2	0	6,36	5,72	4,32	3,73	4,19	3,79	3,69	6,5
Piso 3	0	0	6,23	4,36	3,77	3,83	4,15	4,10	4,4
Piso 4	0	0	0,1	4,80	4,01	4,22	3,69	4,41	2,2
Piso 5	0	0	0	0,3	3,77	3,95	3,71	3,85	0
Piso 6	0	0	0	0,1	0,2	3,40	3,78	3,75	[A·cm <sup>2</sup> ] × 10 <sup>-18</sup>
Piso 7	0	0	0	0	0	0,2	2,89	3,76	
Piso 8	0	0	0	0	0	0	0,2	3,83	

Fig. 6-10. Ejemplo de una matriz triangular de factores de daño de la corriente de oscuridad con cinco elementos de transición

La representación de los errores absolutos de cada elemento seguirá la misma ordenación y misma escala de color. Sin embargo, en los errores porcentuales se cambia la escala de colores: no se permiten los tonos medios, los verdes oscuros serán los valores cuyo error está comprendido entre 0% y 15%, el verde claro los errores entre el 15% y el 30%, el amarillo entre 30% y 75%, el naranja entre el 75% y el 100%, y en rojo todos los superiores al 100%. Al lado de cada matriz se recordará la escala de color para facilitar la interpretación.

En el caso del coeficiente  $r^2$  del ajuste lineal, también se mostrarán usando la misma representación matricial, la escala de color en este caso es como sigue: verde oscuro si el ajuste tiene tres nueves o más, verde claro si posee dos nueves, amarillo si solo tiene uno, naranja si no tienen ninguno pero es superior a 0,7, y rojo los inferiores a 0,7. Esta escala se recordará en cada matriz representada.

En el apéndice D se muestran estas matrices una a una con los datos numéricos tal y como la del ejemplo de la Fig. 6-10. En este capítulo la representación se ha simplificado eliminando los valores y dejando solamente la representación cromática, para que el lector se pueda hacer una idea de la forma, distribución, y orden de magnitud de sus elementos, facilitando seguir la discusión y conclusiones que aquí se describen.

En conclusión, en cada caso considerado se van a mostrar 4 figuras con la representación cromática de las matrices obtenidas: la matriz del sistema, la matriz de errores absolutos, la matriz de errores relativos y la matriz de los coeficientes de correlación lineal  $r^2$  (Fig. 6-11).

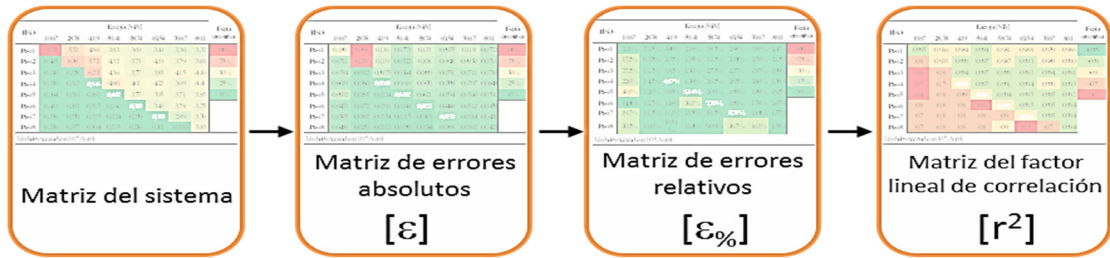


Fig. 6-11. Esquema de las 4 matrices que serán mostradas a lo largo de la presentación de resultados

### 6.3.2 Resultado de la respuesta al flujo – Efectos transitorios ionizantes

Durante la primera campaña de calibración se realizó el ensayo de la respuesta de LDT al flujo de protones (Tabla 6-1). El procedimiento seguido (Apéndice A), establece que se realicen cuatro pasos de irradiación, cada uno con un flujo distinto, para cada una de las energías umbrales, lo que supone un total de 32 pasos.

Finalmente, se ejecutaron 39 pasos, siete más de lo programado, pues el paso 18, el 25, el 27 y el 30 tuvieron que ser repetidos, algunos varias veces, por no cumplir algunas de las características programadas. En la Tabla 6-7, y su continuación (Tabla 6-8), se muestran los datos de la dosimetría directa facilitados por la cámara de ionización situada a la salida del acelerador. Los datos correspondientes a fluencias y dosis son los acumulados durante un paso completo, y los referidos a flujos y tasas de dosis son la media obtenida durante la ejecución del paso. Estas tablas recogen los datos de los protones con los que se irradia, la dosis de ionización (TID) y la dosis de desplazamiento (TNID) expresada como fluencia equivalente de protones de 10 MeV.

Así como la fluencia fue fácil de controlar, el flujo no fue estable ya que fluctuaba y se alejaba del valor prefijado en el procedimiento. Esto se aprecia en la Fig. 6-12, en la que se han representado algunos valores de la Tabla 6-7. Por este motivo el tiempo de los escalones se hizo diferente entre unos pasos y otros para que la fluencia coincidiera con la prefijada en el procedimiento.

Tabla 6-7. Datos de los pasos de irradiación de la calibración de la respuesta al flujo/ionización

Paso ↓	Energía [MeV]	Protones por paso		Dosis acumulada por paso			Tasa de dosis media por paso		Duración del paso [s]
		Fluencia 1, 2 [cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	Flujo <sup>1, 2</sup> [cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	TNID <sup>3</sup> Φ <sub>eq. p<sup>+</sup></sub> 10 MeV [cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	TID exterior <sup>1</sup> [rad]	TID interior <sup>4</sup> [rad]	TNID <sup>3</sup> Φ <sub>eq. p<sup>+</sup></sub> 10 MeV [cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	TID exterior <sup>1</sup> [rad/s] ×10 <sup>-3</sup>	
1	10,67	0,600	9,68	0,5801	0,315	0,330	9,356	5,087	62
2	28,78	0,603	33,52	0,3469	0,147	0,332	19,27	8,147	18
3	40,9	0,601	6,01	0,2875	0,111	0,331	2,88	1,110	100
4	50,41	0,604	9,29	0,2590	0,095	0,332	3,984	1,458	65
5	58,74	0,604	11,40	0,2391	0,084	0,332	4,511	1,589	53
6	63,54	0,600	13,95	0,2279	0,079	0,330	5,299	1,832	43
7	70,67	0,595	17,00	0,2138	0,072	0,327	6,107	2,059	35
8	80,1	0,600	22,21	0,2018	0,066	0,330	7,474	2,449	27
9	10,67	3,001	48,41	2,901	1,577	1,651	46,79	25,440	62
10	28,78	3,001	107,2	1,726	0,729	1,651	61,63	26,050	28
11	40,9	3,021	58,1	1,445	0,558	1,662	27,79	10,720	52
12	50,41	3,015	53,8	1,293	0,473	1,659	23,08	8,446	56
13	58,74	3,008	12,6	1,190	0,420	1,655	4,981	1,755	239
14	63,54	3,003	39,0	1,141	0,394	1,652	14,81	5,122	77
15	70,67	3,016	48,6	1,083	0,365	1,659	17,48	5,891	62
16	80,1	3,023	63,0	1,017	0,333	1,663	21,19	6,942	48
17	10,67	3,054	61,1	2,952	1,605	1,680	59,04	32,100	50
18	28,78	3,134	313,4	1,802	0,762	1,724	180,2	76,180	10
19	28,78	3,167	287,9	1,821	0,770	1,742	165,5	69,980	11
20	40,9	6,027	207,8	2,883	1,113	3,316	99,41	38,370	29
21	50,41	6,017	146,8	2,580	0,944	3,310	62,92	23,020	41
22	58,74	6,041	53,5	2,391	0,842	3,323	21,16	7,455	113
23	63,54	6,020	59,6	2,287	0,791	3,312	22,64	7,827	101
24	70,67	6,018	73,4	2,162	0,729	3,311	26,37	8,888	82
25	80,1	-	-	-	-	-	-	-	14
26	80,1	6,040	131,3	2,032	0,666	3,323	44,18	14,470	46

Nota <sup>1</sup>: estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Son los datos verificados en cada paso para comprobar que se han cumplido las condiciones preestablecidas en el procedimiento.

Nota <sup>2</sup>: este dato coincide también con la fluencia de protones de 10 MeV interna.

Nota <sup>3</sup>: datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.

Nota <sup>4</sup>: datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.

Tabla 6-8. Continuación de la “Tabla 6-7”

Paso ↓	Energía [MeV]	Protones por paso		Dosis por paso			Tasa de dosis media por paso		Duración del paso [s]
		Fluencia 1,2 [cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	Flujo <sup>1,2</sup> [cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	TNID <sup>3</sup> Φ <sub>eq. p<sup>+</sup></sub> 10 MeV [cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	TID exterior <sup>1</sup> [rad]	TID interior <sup>4</sup> [rad]	TNID <sup>3</sup> Φ <sub>eq. p<sup>+</sup></sub> 10 MeV [cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	TID exterior <sup>1</sup> [rad/s] ×10 <sup>-3</sup>	
27	10,67	1,865	62,2	1,803	0,980	1,026	60,09	32,670	30
28	10,67	10,100	631,5	9,763	5,311	5,557	610,18	331,900	16
29	10,67	10,650	887,8	10,29	5,599	5,859	857,9	466,600	12
30	28,78	11,520	1645,0	6,624	2,799	6,338	946,2	399,800	7
31	28,78	10,260	855,2	5,899	2,494	5,645	491,6	207,900	12
32	28,78	10,020	910,9	5,761	2,435	5,513	523,8	221,400	11
33	28,78	10,450	454,5	6,009	2,541	5,749	261,2	110,500	23
34	40,9	10,280	367,3	4,917	1,899	5,656	175,6	67,810	28
35	50,41	10,090	388,0	4,326	1,583	5,551	166,4	60,870	26
36	58,74	10,040	143,5	3,973	1,401	5,524	56,76	20,010	70
37	63,54	10,070	245,7	3,825	1,323	5,540	93,29	32,270	41
38	70,67	10,240	301,3	3,679	1,241	5,634	108,2	36,490	34
39	80,1	10,060	503,0	3,385	1,109	5,535	169,2	55,440	20

*Nota <sup>1</sup>: estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Son los datos verificados en cada paso para comprobar que se han cumplido las condiciones preestablecidas en el procedimiento.*

*Nota <sup>2</sup>: este dato coincide también con la fluencia de protones de 10 MeV interna.*

*Nota <sup>3</sup>: datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.*

*Nota <sup>4</sup>: datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.*

Los datos de la fluencia, de la TNID y del flujo se han representado en la Fig. 6-12. En esta misma figura se han marcado los pasos correspondientes a cada uno de los cuatro flujos usados, indicando el valor establecido en el procedimiento. Se puede apreciar lo irregular del flujo y las fluctuaciones que hay entre unos pasos y otros, y como su valor se aleja considerablemente del establecido por el procedimiento. Los datos de la fluencia se han representado en el eje de la izquierda, y los del flujo en el eje logarítmico de la derecha. Se observa como el TNID (fluencia Eq. de 10 MeV) disminuye con el aumento de la energía.

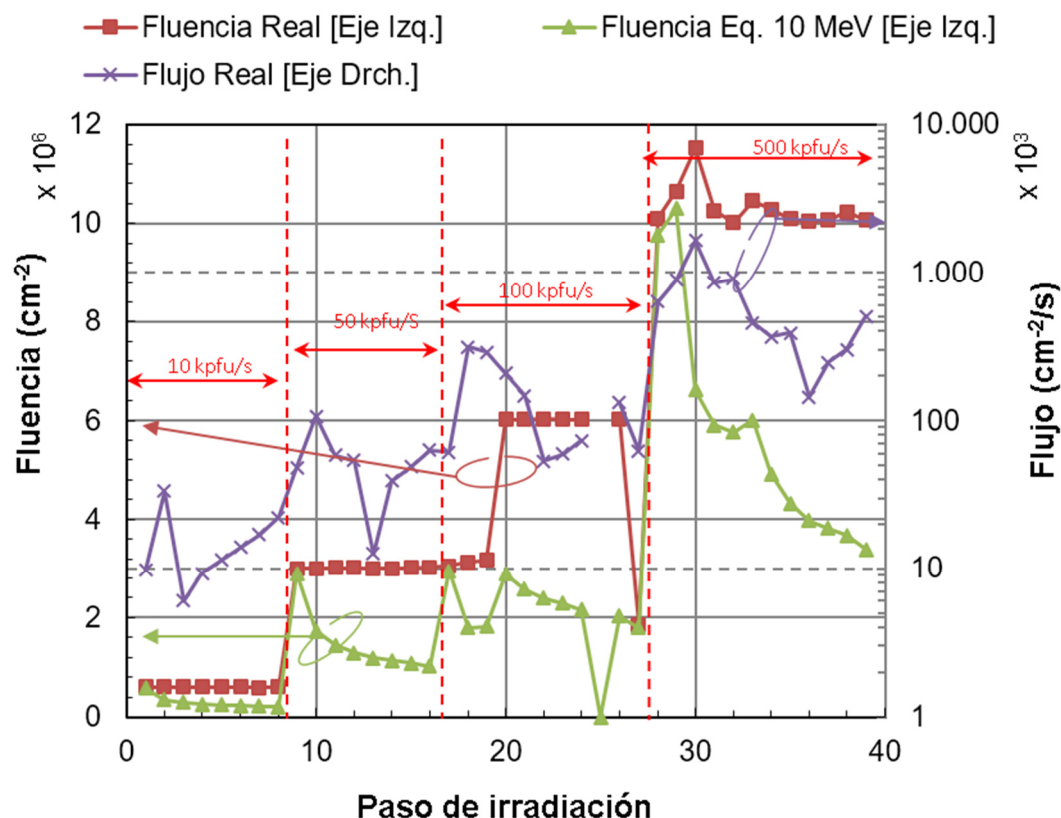


Fig. 6-12. Representación de algunos parámetros del haz de irradiación, durante la calibración de la respuesta al flujo, en función del paso de irradiación

La Tabla 6-9 y su continuación (Tabla 6-10) muestran las fluencias y las dosis acumuladas paso a paso. En ellas se verifica que la dosis máxima posible que podría haber recibido alguna parte de LDT es de solo  $\sim 110$  rad. También se distingue que la fluencia máxima equivalente de 10 MeV en el interior (la cota máxima del daño) es de  $\sim 202 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ .

Tabla 6-9 Fluencias y dosis acumuladas de la calibración de la respuesta al flujo – Ionización

Paso ↙	Energía [MeV]	Fluencia total acumulada		Dosis total acumulada	
		Protones <sup>1,2</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TNID <sup>3</sup> Exterior <sup>1</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TID Exterior <sup>1</sup> [rad]	TID Interior <sup>4</sup> [rad]
1	10,67	0,6001	0,5801	0,315	0,330
2	28,78	1,203	0,9270	0,462	0,662
3	40,9	1,805	1,214	0,573	0,993
4	50,41	2,409	1,473	0,668	1,33
5	58,74	3,013	1,713	0,752	1,66
6	63,54	3,613	1,940	0,831	1,99
7	70,67	4,208	2,154	0,903	2,31
8	80,1	4,807	2,356	0,969	2,64
9	10,67	7,808	5,257	2,55	4,30
10	28,78	10,809	6,982	3,28	5,95
11	40,9	13,830	8,427	3,83	7,61
12	50,41	16,845	9,720	4,31	9,27
13	58,74	19,853	10,91	4,73	10,92
14	63,54	22,856	12,05	5,12	12,57
15	70,67	25,872	13,13	5,49	14,23
16	80,1	28,895	14,15	5,82	15,90
17	10,67	31,949	17,10	7,42	17,58
18	28,78	35,083	18,91	8,19	19,30
19	28,78	38,250	20,73	8,95	21,04
20	40,9	44,277	23,61	10,07	24,36
21	50,41	50,294	26,19	11,01	27,67
22	58,74	56,335	28,58	11,85	30,99
23	63,54	62,355	30,87	12,64	34,31
24	70,67	68,373	33,03	13,37	37,62
25	80,1	68,331	33,03	13,37	37,59
26	80,1	74,371	35,06	14,04	40,92

*Nota <sup>1</sup>:* estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Es la dosis en el exterior de LDT

*Nota <sup>2</sup>:* este dato es también la fluencia de protones de 10 MeV interna.

*Nota <sup>3</sup>:* expresado en fluencia eq. de protones de 10 MeV. Datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.

*Nota <sup>4</sup>:* datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.

Tabla 6-10. Continuación de la “Tabla 6-9”

Paso ↓	Fluencia total acumulada		Dosis total acumulada		
	Energía [MeV]	Protones <sup>1,2</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TNID <sup>3</sup> Exterior <sup>1</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TID Exterior <sup>1</sup> [rad]	TID Interior <sup>4</sup> [rad]
27	10,67	76,236	36,86	15,02	41,94
28	10,67	86,336	46,63	20,33	47,50
29	10,67	96,986	56,92	25,93	53,36
30	28,78	108,51	63,54	28,73	59,70
31	28,78	118,77	69,44	31,22	65,34
32	28,78	128,79	75,21	33,66	70,85
33	28,78	139,24	81,21	36,20	76,60
34	40,9	149,52	86,13	38,10	82,26
35	50,41	159,61	90,46	39,68	87,81
36	58,74	169,65	94,43	41,08	93,33
37	63,54	179,72	98,26	42,40	98,87
38	70,67	189,96	101,9	43,65	104,51
39	80,1	200,02	105,3	44,75	110,04

*Nota <sup>1</sup>: estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Es la dosis en el exterior de LDT*

*Nota <sup>2</sup>: este dato es también la fluencia de protones de 10 MeV interna.*

*Nota <sup>3</sup>: expresado en fluencia eq. de protones de 10 MeV. Datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.*

*Nota <sup>4</sup>: datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.*

Los datos de la dosimetría mostrada en las tablas anteriores fueron corregidos para compensar las inhomogeneidades espaciales del haz de p<sup>+</sup>, posteriormente se calculó la dependencia de las señales de los sensores de LDT con el flujo. Los resultados obtenidos se presentan en los próximos apartados.

#### A. Sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de oscuridad

En la Fig. 6-13 se muestra la sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de oscuridad, sus errores absolutos, sus errores relativos y el coeficiente de correlación  $r^2$  respectivamente.

Se trata de una matriz en donde los valores de los elementos inferiores a la diagonal principal, son entre 4 y 5 órdenes de magnitud más pequeños que los elementos del triángulo superior. Es decir, la mayoría de ellos son despreciables frente al triángulo superior, y posee once elementos de transición.

De las tablas con los errores y el coeficiente de correlación se observa que los elementos del triángulo inferior tienen unos errores mayores y sus coeficientes de correlación son peores, es decir, su dependencia con el flujo es sustancialmente inferior

que los elementos del triángulo superior. Esto es así excepto para los once elementos de transición.

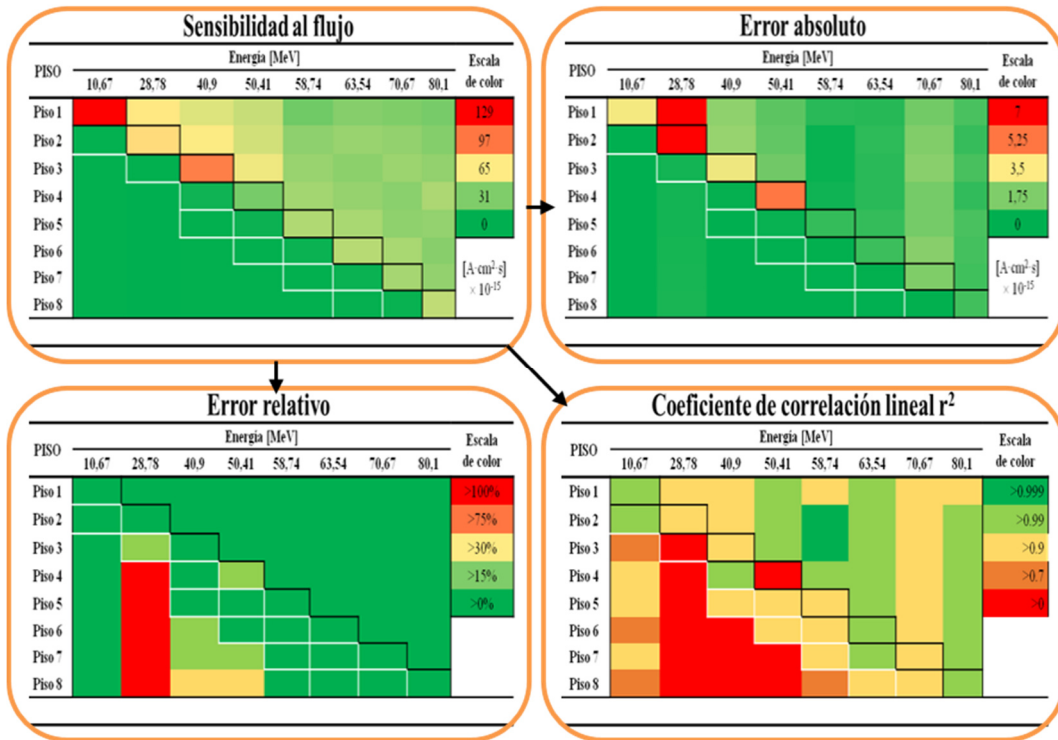


Fig. 6-13. Representación cromática de la matriz de sensibilidad al flujo de la torre de fotodiodos, sus errores y coeficientes de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice D

## B. Sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de luz

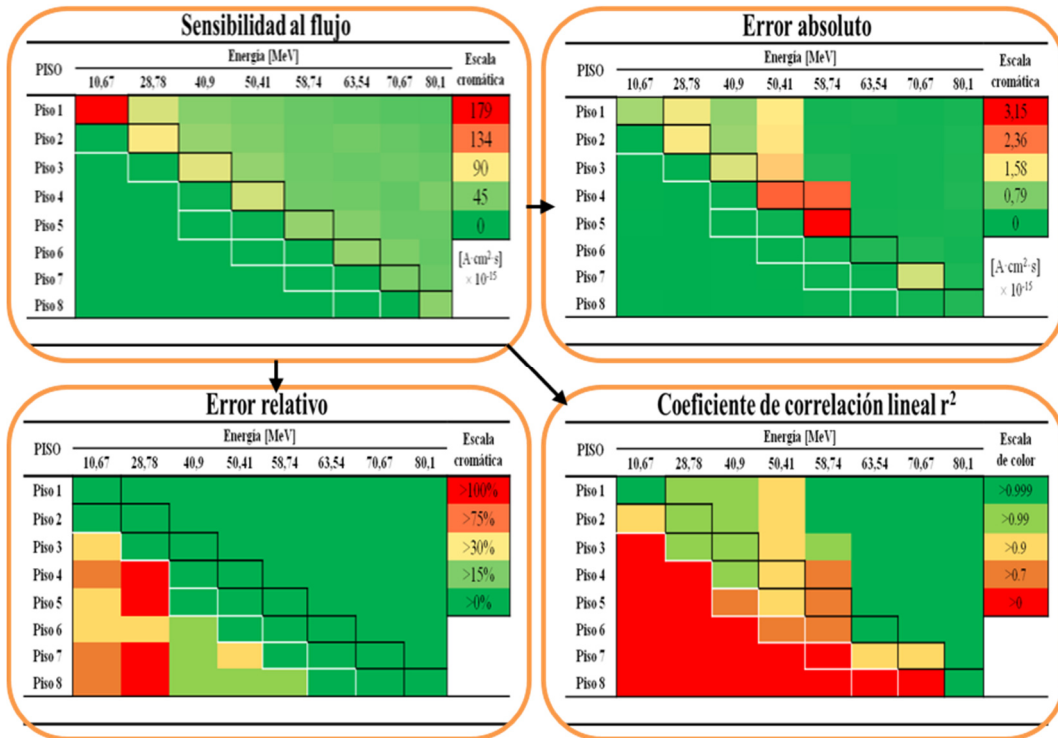


Fig. 6-14. Representación cromática de la matriz de sensibilidad al flujo de la torre de LED, sus errores y coeficientes de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice D



En la Fig. 6-14 se ha mostrado la representación cromática de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de LED, sus errores absolutos, sus errores relativos y los coeficientes de correlación  $r^2$ , respectivamente. En esta ocasión los elementos del triángulo inferior vuelven a ser despreciables, a excepción de otros once elementos de transición.

### 6.3.3 Resultado de la respuesta a la fluencia – Efectos acumulativos por DD

Algunas características de la calibración de LDT frente a la fluencia (o daños por desplazamiento) para la determinación de las matrices de los factores de daño fueron mostradas en la Tabla 6-1, el procedimiento está descrito en el Apéndice A y determina que se irradian tres pasos iguales con cada una de las ocho energías umbrales, un total de 24 pasos de irradiación. Durante la ejecución fue necesario un paso más, pues el 63 no alcanzó el flujo deseado y tuvo que ser repetido. La Tabla 6-11 muestra la dosimetría directa facilitada por la cámara de ionización a la salida del acelerador, donde los datos de fluencias y dosis son los acumulados en cada paso, y los flujos y tasas son la media obtenida durante el paso. Se ha calculado la dosis de desplazamiento (TNID) y se ha expresado en fluencia equivalente de protones de 10 MeV, también se muestra el flujo equivalente correspondiente. La TID acumulada en el *exterior*, y en el *interior*, también ha sido calculadas y mostradas.

Los datos de la fluencia total acumulada se desvían menos de un 2% del requisito de partida, y la mayoría de los flujos menos del 5%. En este caso, se trató de una irradiación regular en el que el haz de protones fue estable y no sufrió fluctuaciones.

Los datos de la fluencia, del TNID y el flujo se han representado en la Fig. 6-15, en la que se han marcado las energías de los diferentes escalones de irradiación. Se aprecia la estabilidad del flujo durante toda la irradiación excepto en el paso 63, que como se ha explicado, tuvo que ser repetido. Los datos de la fluencia se representan en el eje de la izquierda y los del flujo en el eje de la derecha. Se observa como la TNID (fluencia eq. de  $p^+$  de 10 MeV) disminuye con el aumento de la energía.

Tabla 6-11. Datos de los pasos de irradiación de la calibración de la respuesta a la fluencia – DD.

Paso	Energía	Protones por paso		Dosis por paso			Tasa de dosis media por paso		Duración del paso
		Fluencia	Flujo <sup>1, 2</sup>	TNID <sup>3</sup>	TID exterior <sup>1</sup>	TID interior <sup>4</sup>	TNID <sup>3</sup>	TID exterior <sup>1</sup>	
		$1, 2$		$\Phi_{eq, p^+}$ 10 MeV			$\Phi_{eq, p^+}$ 10 MeV		
	[MeV]	[cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	[cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	[cm <sup>-2</sup> ] ×10 <sup>6</sup>	[rad]	[rad]	[cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>3</sup>	[rad/s] ×10 <sup>-3</sup>	[s]
42	10,67	5,076	95,8	4,907	2,67	2,79	92,58	50,3	53
43		5,052	97,2	4,883	2,66	2,78	93,91	51,1	52
44		5,015	96,5	4,848	2,64	2,76	93,22	50,7	52
45	28,78	5,023	103	2,888	1,22	2,76	58,94	24,9	49
46		5,031	103	2,893	1,22	2,77	59,03	25,0	49
47		5,012	102	2,882	1,22	2,76	58,81	24,9	49
48	40,9	5,038	95,1	2,410	0,93	2,77	45,47	17,6	53
49		5,080	95,8	2,430	0,94	2,79	45,85	17,7	53
50		5,012	98,3	2,397	0,93	2,76	47,01	18,1	51
51	50,41	5,006	94,5	2,146	0,79	2,75	40,50	14,8	53
52		5,079	94,1	2,178	0,80	2,79	40,33	14,8	54
53		5,068	93,8	2,173	0,80	2,79	40,24	14,7	54
54	58,74	5,037	107	1,993	0,70	2,77	42,41	14,9	47
55		5,042	107	1,995	0,70	2,77	42,46	15,0	47
56		5,093	108	2,016	0,71	2,80	42,89	15,1	47
57	63,54	5,028	101	1,910	0,66	2,77	38,19	13,2	50
58		5,055	101	1,920	0,66	2,78	38,40	13,3	50
59		5,036	101	1,913	0,66	2,77	38,26	13,2	50
60	70,67	5,022	98,5	1,804	0,61	2,76	35,38	11,9	51
61		5,006	1,00	1,798	0,61	2,75	35,97	12,1	50
62		5,052	99,1	1,815	0,61	2,78	35,59	12,0	51
63	80,1	0,254	97,6	0,085	0,03	0,14	3,28	10,8	26
64		5,051	97,1	1,699	0,56	2,78	32,68	10,7	52
65		5,058	97,3	1,702	0,56	2,78	32,73	10,7	52
66		5,047	97,1	1,698	0,56	2,78	32,65	10,7	52

*Nota <sup>1</sup>: estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Son los datos verificados en cada paso para comprobar que se han cumplido las condiciones preestablecidas en el procedimiento.*

*Nota <sup>2</sup>: este dato coincide también con la fluencia de protones de 10 MeV interna.*

*Nota <sup>3</sup>: datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.*

*Nota <sup>4</sup>: datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.*

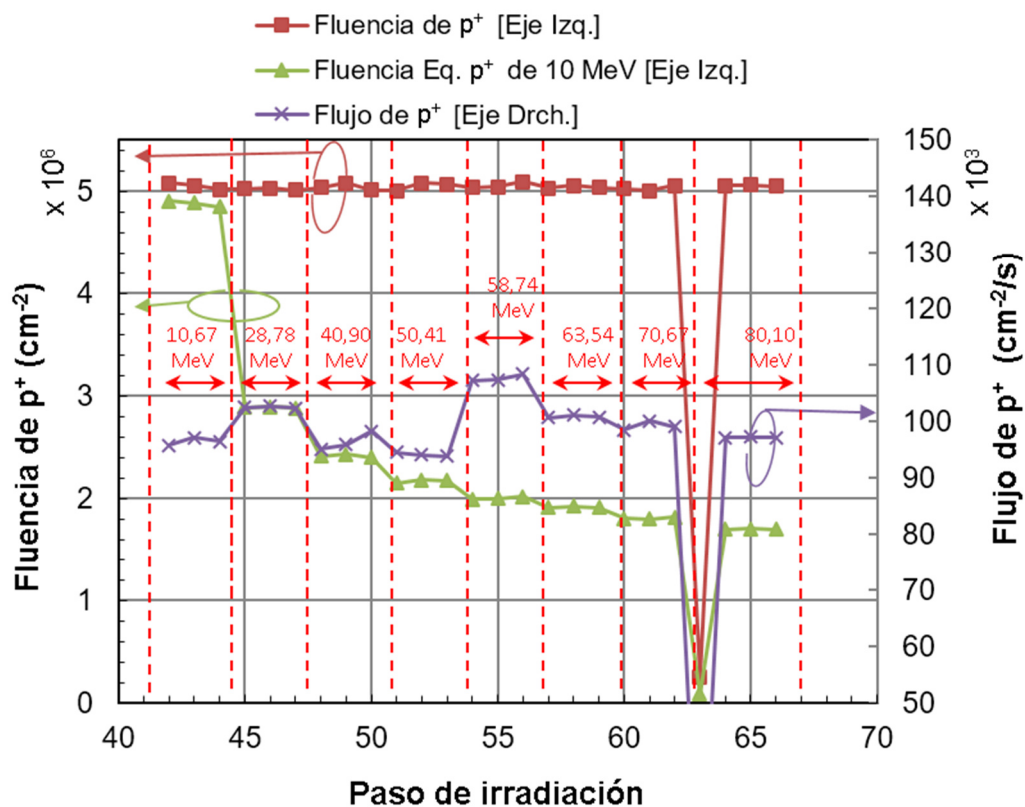


Fig. 6-15. Representación de algunos parámetros del haz de irradiación durante la calibración de la fluencia, en función del paso de irradiación

La Tabla 6-12 muestra las fluencias y las dosis acumuladas paso a paso. En ella se verifica que la dosis máxima posible que podría haber recibido alguna parte de LDT es de tan solo  $\sim 67$  rad. También se distingue que la fluencia máxima equivalente de 10 MeV interna (la cota máxima del daño) es de  $\sim 121 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ .

Tabla 6-12. Fluencias y dosis acumuladas de la calibración de la respuesta a la fluencia – DD.

Paso	Energía [MeV]	Fluencia total acumulada		Dosis total acumulada	
		Protones <sup>1,2</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TNID <sup>3</sup> Exterior <sup>1</sup> [cm <sup>-2</sup> ] × 10 <sup>6</sup>	TID Exterior <sup>1</sup> [rad]	TID Interior <sup>4</sup> [rad]
42	10,67	5,076	4,907	2,67	2,79
43		10,13	9,790	5,32	5,57
44		15,14	14,64	7,96	8,33
45	28,78	20,17	17,53	9,18	11,09
46		25,20	20,42	10,40	13,86
47		30,21	23,30	11,62	16,62
48	40,9	35,25	25,71	12,55	19,39
49		40,33	28,14	13,49	22,19
50		45,34	30,54	14,41	24,94
51	50,41	50,35	32,68	15,20	27,70
52		55,42	34,86	16,00	30,49
53		60,49	37,03	16,79	33,28
54	58,74	65,53	39,03	17,49	36,05
55		70,57	41,02	18,20	38,82
56		75,66	43,04	18,91	41,63
57	63,54	80,69	44,95	19,57	44,39
58		85,75	46,87	20,23	47,17
59		90,78	48,78	20,89	49,94
60	70,67	95,81	50,59	21,50	52,71
61		100,8	52,38	22,11	55,46
62		105,9	54,20	22,72	58,24
63	80,1	106,1	54,28	22,75	58,38
64		111,2	55,98	23,30	61,16
65		116,2	57,69	23,86	63,94
66		121,3	59,38	24,42	66,72

*Nota <sup>1</sup>: estos datos de dosimetría se refieren a los datos proporcionados por la cámara de ionización que se encuentra a la salida del acelerador. Es la dosis en el exterior de LDT*

*Nota <sup>2</sup>: este dato es también la fluencia de protones de 10 MeV interna.*

*Nota <sup>3</sup>: expresado en fluencia eq. de protones de 10 MeV. Datos obtenidos por medio del NIEL de protones en silicio.*

*Nota <sup>4</sup>: datos obtenidos por medio del LET de protones de 10 MeV en silicio.*

Tras la compensación de los datos anteriores por la inhomogeneidad del haz, se realizaron los ajustes lineales de todos los sensores de LDT para obtener los factores de daño. Los resultados obtenidos se presentan en los próximos apartados.

#### A. Factor de daño de los fotodiodos – Torre de oscuridad

En la Fig. 6-16 se muestran los factores de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos de la torre 2, sus errores absolutos, sus errores relativos, y los coeficientes de correlación  $r^2$ . Los valores numéricos de estos resultados se muestran en el Apéndice D.

Puede apreciarse, que en la matriz del sistema, los elementos inferiores a la diagonal principal son un orden de magnitud menor que los elementos del triángulo superior. Es decir, no llegan a ser despreciables frente al resto, aunque la matriz sí que tiene simetría triangular. Estos elementos tienen errores mayores y coeficientes de correlación menores, es decir, su dependencia con la fluencia es sustancialmente inferior a los elementos del triángulo superior. También se encuentran cuatro elementos de transición.

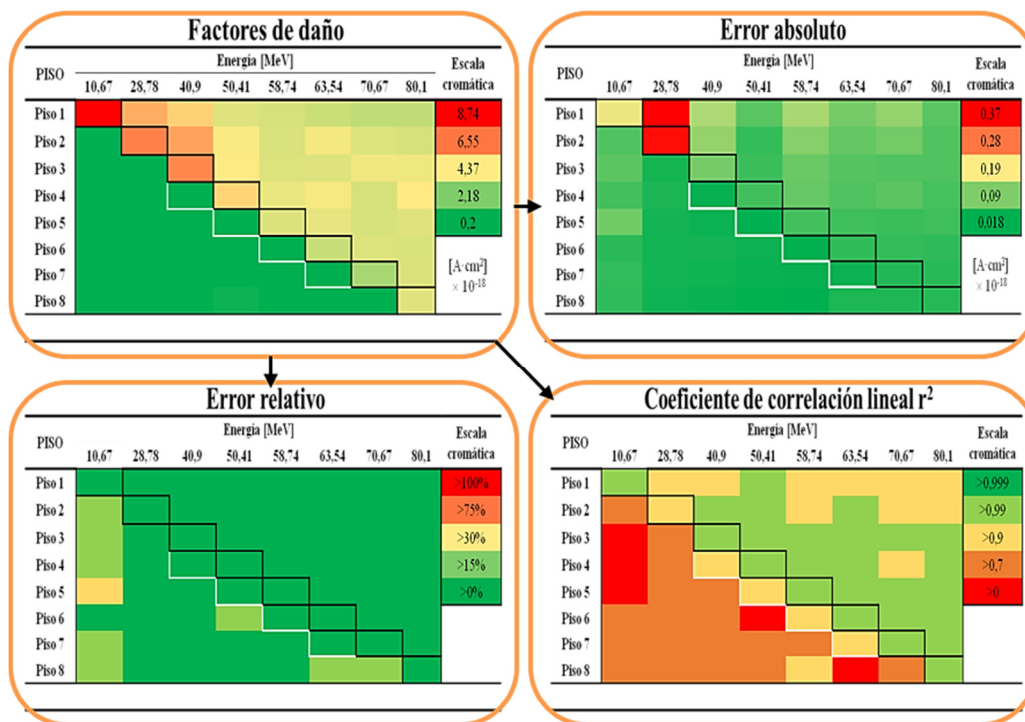


Fig. 6-16. Representación cromática de la matriz de factores de daño de la torre de fotodiodos y sus errores y coeficiente de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice D

En definitiva, se está ante una matriz con una forma triangular marcada, en la que los elementos del triángulo inferior no son despreciables y en el que se encuentran elementos de transición. Estas características se resumen en la Tabla 6-14 mostrada en las conclusiones del capítulo.

### B. Factor de daño de los LED – Torre de luz

La Fig. 6-17 muestra la representación cromática de los factores de daño de la potencia óptica de emisión del LED de la torre luz, sus errores y los coeficientes de correlación lineal. La matriz de factores de daño tiene dos elementos, que han sido eliminados de la escala de color para mejorar la representación, que son claramente superiores al resto. Se observa una cierta tendencia a que los elementos del triángulo

superior tengan valores más altos que los elementos del triángulo inferior, pero la forma es claramente no triangular e irregular.

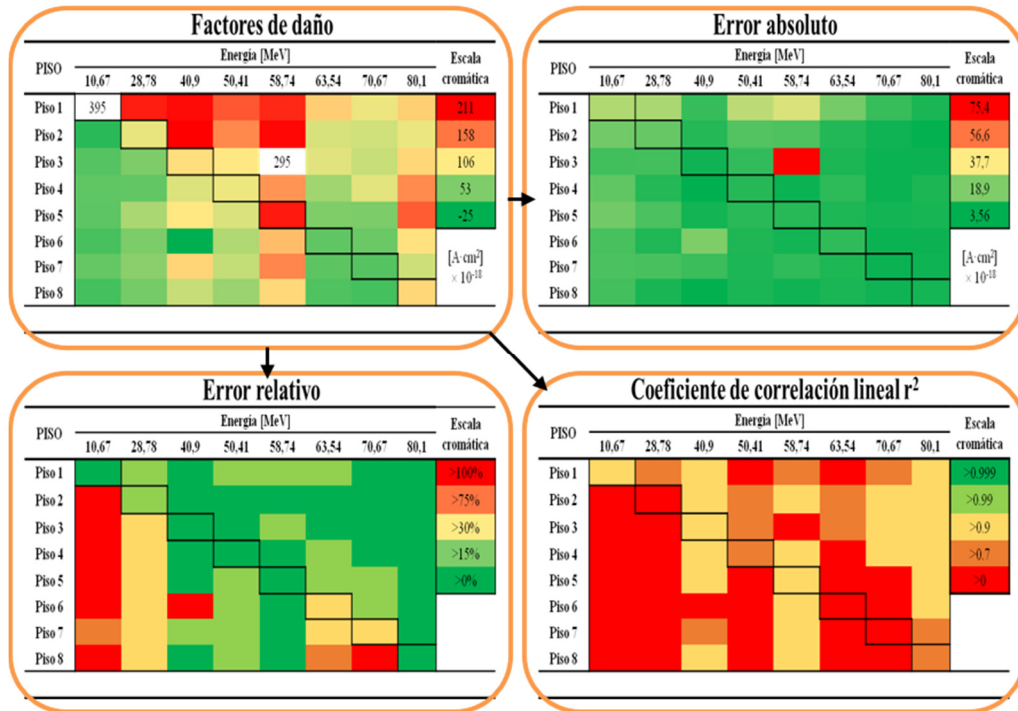


Fig. 6-17. Representación cromática de la matriz de daño de la torre de LED, sus errores y coeficientes de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice D.

Analizando la forma de estas matrices, se observa que la respuesta de los LED no ha sido la esperada, aunque sí que tienen una cierta tendencia a que los elementos del triángulo superior tengan valores más altos, errores más bajos y coeficientes de correlación también más altos. Esta falta de simetría triangular se debe a señales ruidosas, las cuales han dado como resultado una baja correlación en los ajustes lineales. Algunos ejemplos se muestran en las Fig. 6-18 y Fig. 6-19.

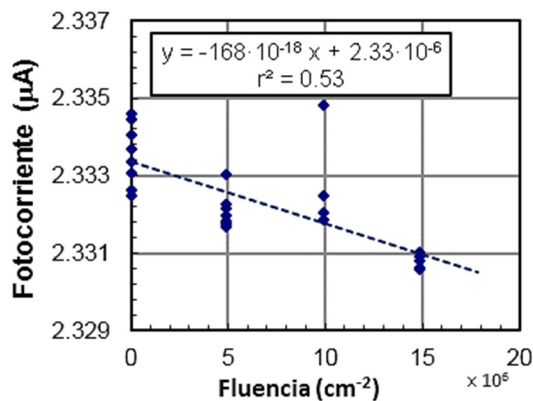


Fig. 6-18. Fotocorriente generada en el piso 1 en función de la fluencia de protones de 50,41 MeV (energía umbral del piso 4)

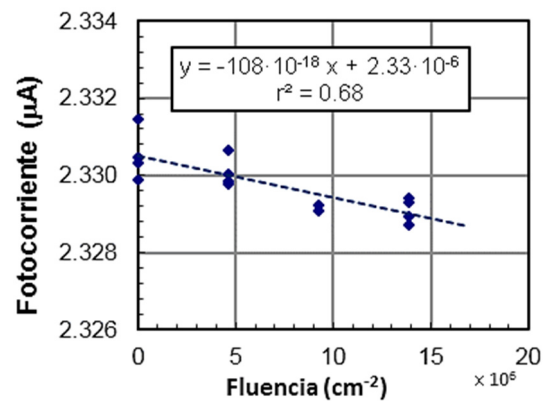


Fig. 6-19. Fotocorriente generada en el piso 1 en función de la fluencia de protones de 63,54 MeV (energía umbral del piso 6)

Sin embargo, ha habido otros casos en los que esta desviación de la simetría de la matriz no puede atribuirse al ruido excesivo de las señales. Son aquellos casos en los que pisos irradiados con energías inferiores a su energía umbral, se han visto dañados y han mostrado una tendencia lineal bien definida. Las Fig. 6-20 y Fig. 6-21 muestran el caso del paso de irradiación con protones de 40,9 MeV (Energía umbral del piso 3) para dos pisos diferentes de la torre de LED: para el piso 1 cuya degradación es la esperada debido a que los protones de esa energía alcanzan el piso de forma directa (Fig. 6-20), y para el piso 7, que se degrada, a pesar de que los protones de esa energía no deberían de alcanzar el LED correspondiente (Fig. 6-21).

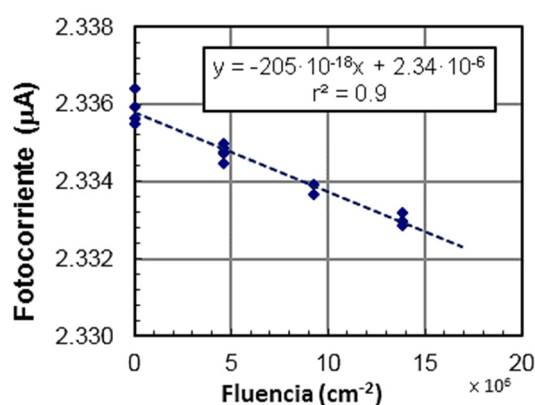


Fig. 6-20. Fotocorriente generada en el piso 1 en función de la fluencia de protones de 40,9 MeV (Energía umbral del piso 3)

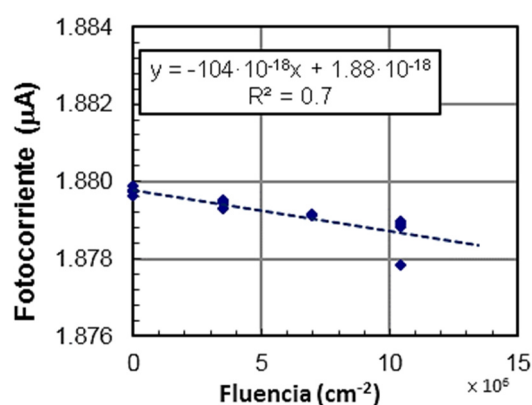


Fig. 6-21. Fotocorriente generada en el piso 7 en función de la fluencia de protones de 40,9 MeV (Energía umbral del piso 3)

Para analizar si se debía a un efecto térmico se consideró conveniente aplicar las correcciones térmicas. Esa corrección no produjo ningún efecto sustancial en los resultados, sin embargo, no se descartan del todo posibles efectos debidos al cambio de la temperatura del LED, ya que el sensor TMP-36 está colocado bajo el fotodiodo y, por tanto, ligeras variaciones de la temperatura del LED podrían pasar desapercibidas. En concreto, una de las hipótesis que se baraja es que efectos de auto-calentamiento al encender el LED podrían ser la causa. Este tipo de efectos, se trataron de minimizar al definir la secuencia de medida. Dicha secuencia contempla una estabilización del LED dejándolo encendido siempre el mismo tiempo antes de tomar una medida. Sin embargo, un cambio de temperatura tan pequeño como 0,1 °C <sup>[14]</sup>, produciría una variación en la

<sup>14</sup> Calculado a partir de los datos de la calibración térmica de los LED en §6.4.1

corriente que sería de un valor similar al del efecto presentado en la Fig. 6-21, en el que la fotocorriente decae  $\sim 1$  nA.

### 6.3.4 Conclusiones e Implicaciones

En la Tabla 6-13 se muestran las características de las matrices obtenidas durante la calibración de LDT con el flujo de protones y sus principales implicaciones.

Tabla 6-13. Características de la matriz de sensibilidad al flujo

	<b>Torre de oscuridad</b>	<b>Torre de luz</b>
<b>Dispositivo</b>	Fotodiodo [S5707]	Fotodiodo [S5107]
<b>Simetría</b>	Triangular	Triangular
<b>Diferencia entre elementos del triángulo superior e inferior</b>	Entre 4 y 5 órdenes de magnitud	Entre 4 y 5 órdenes de magnitud
<b>Elementos del triángulo inferior</b>	Despreciables	Despreciables
<b>Elementos de transición</b>	11	11
<b>Sensibilidad media</b>	$(46,0 \pm 20) \times 10^{-15}$ [A/(cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )]	$(49,0 \pm 26) \times 10^{-15}$ [A/(cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )]
<b>Incertidumbre media</b>	< 5%	< 1%
<b>Conclusiones e implicación</b>	Simetría patente en las 4 matrices.	Simetría patente en las 4 matrices.
	El rango dinámico permitirá medir habitualmente en la órbita LEO de NANOSAT-1B.	Mayor rango dinámico: Se usará con flujos excepcionalmente altos si la torre de oscuridad satura.
	Los elementos de la matriz son adecuados para medir el flujo.  La resolución del sistema de ecuaciones está en duda debido a las incertidumbres de los elementos de la matriz	Los elementos de la matriz son adecuados para medir el flujo.  La resolución del sistema de ecuaciones se considera posible



En la Tabla 6-14 se muestran las características de las matrices de DD y las principales implicaciones en LDT.

Tabla 6-14. Características de la matriz de factores de daño de la corriente de oscuridad – Torre 2

	Torre de oscuridad	Torre de luz
Dispositivo	Fotodiodo [S5107]	LED [S9338]
Simetría	Triangular	Cierta tendencia a simetría triangular
Diferencia entre elementos del triángulo superior e inferior	Un orden de magnitud	Menos de un orden de magnitud
Elementos del triángulo inferior	No despreciable	No despreciable
Elementos de transición	4	-
Factor de daño medio	$(4,25 \pm 1,1) \times 10^{-18}$ [A/cm <sup>-2</sup> ]	$(106,8 \pm 58) \times 10^{-18}$ [A cm <sup>-2</sup> ]
Incertidumbre media	< 3%	> 10 %
Conclusiones e implicación	Simetría patente solo en dos matrices: factor de daño y coeficientes de correlación lineal $r^2$	Posible causa de la inexistencia de simetría: efectos de ionización por secundarios, efectos térmicos.
	Los elementos de la matriz son adecuados para medir el flujo.	No todos los pisos han quedado bien calibrados. Con el resto, sí se podrá medir el flujo.
	El sistema de ecuaciones debería poder resolverse.	No se podrá resolver el sistema de ecuaciones.

## 6.4 Calibración térmica

El objetivo de la calibración térmica es obtener la relación que hay entre la señal de los fotodiodos y la del sensor de temperatura. Esta relación se obtendrá para cada pareja fotodiodo/TMP-36. Se encontrarán dos comportamientos distintos: el de la torre de fotodiodos en el que domina la dependencia de la corriente de oscuridad con la temperatura, y el de la torre de LED en la que domina la dependencia de la emisión óptica del LED con la temperatura.

Para calibrar la respuesta térmica de LDT, se introdujo el instrumento en una estufa *Binner MK 53*. La temperatura se modificó entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $+40^{\circ}\text{C}$ , a un ritmo de  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Se dejaron 30 minutos de estabilización en la temperatura alta ( $+40^{\circ}\text{C}$ ) y otros tantos en la baja ( $-5^{\circ}\text{C}$ ). Para la monitorización de la temperatura se usaron los TMP-36 pegados en la parte posterior de cada fotodiodo. Para verificar el desfase de la temperatura entre el sensor térmico, el fotodiodo y el LED se realizó una rampa ascendente y otra descendente. En un ensayo de estas características, si la línea ascendente y la descendente no son iguales, significa que la variación de temperatura está siendo muy rápida y que hay gradientes térmicos, en este caso hubiera significado que el sensor térmico, el fotodiodo y el LED no estaban a la misma temperatura.

La Fig. 6-22 muestra un pantallazo del EGSE de control de LDT durante la calibración térmica, realizada sobre el FM. En esta imagen puede verse, tanto los datos para un piso de la torre de oscuridad (derecha), como los de la torre de luz (izquierda). Las gráficas superiores muestran la señal medida en los fotodiodos, las gráficas del medio corresponden a la señal de los sensores de temperatura, y en las gráficas de abajo se representa la señal de los fotodiodos frente a la señal de los sensores de temperatura. En estas se aprecia que las líneas de subida y bajada son coincidentes, por lo que el ritmo de variación de la temperatura fue adecuado. En estas mismas gráficas, se aprecia que la potencia óptica del LED tiene una relación lineal de pendiente negativa con la temperatura, mientras la corriente de oscuridad del fotodiodo es una función exponencial.

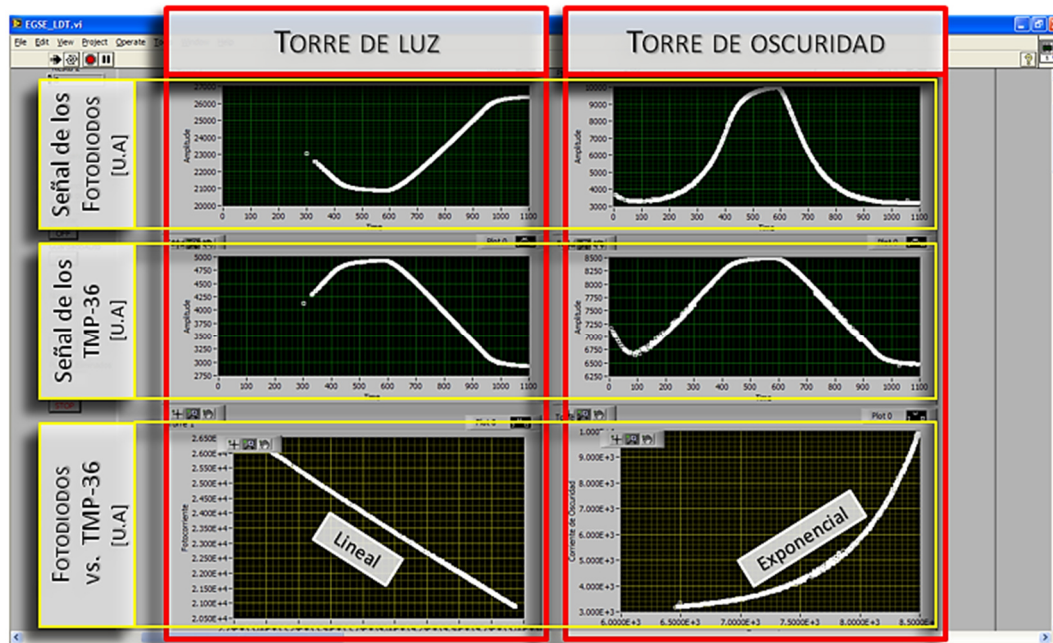


Fig. 6-22. Pantallazo de EGSE tras la caracterización térmica de los sensores de radiación de LDT

Los siguientes apartados muestran los parámetros obtenidos del ajuste lineal y exponencial de cada uno de los pisos, de ambas torres de LDT.

### 6.4.1 Torre de luz

La fotocorriente generada por los LED en los fotodiodos de la torre de luz tiene una dependencia lineal con la temperatura:

$$I(A) = -m(T - 22.7) + b \quad 6-1$$

en donde:

- $I$  es la fotocorriente generada en el fotodiodo de un piso con su LED encendido. La componente principal de esta corriente es la que se genera por la luz que le llega del LED.
- $T$  es la temperatura registrada por el sensor TMP-36 pegado en la parte trasera del fotodiodo del piso bajo estudio.
- $m$  es la pendiente de la recta.
- $b$  es la corriente generada a 22,7 °C.

Este ajuste se realizó desplazando las temperaturas 22,7 °C porque esa fue la temperatura media medida por los TMP-36 de esa torre durante la calibración de radiación.

La Fig. 6-23 representa la evolución de la señal con la temperatura de todos los pisos de la torre de luz, la tabla 6-15 muestra los parámetros del ajuste lineal (ecuación 6-1) y la tabla 6-16 los errores estadísticos de esos mismos parámetros.

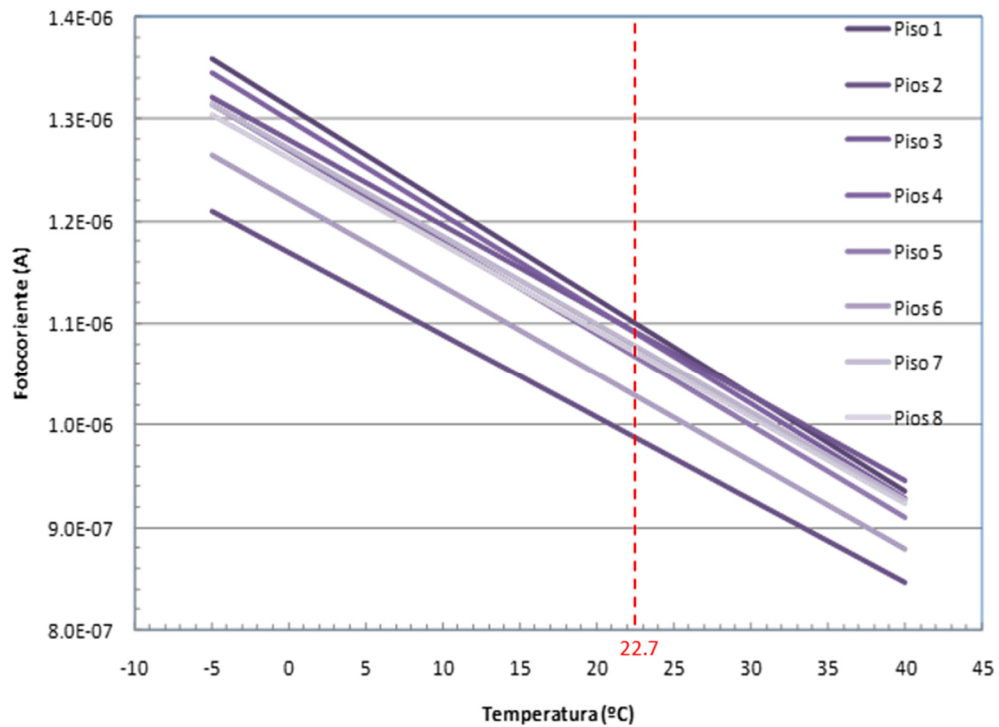


Fig. 6-23. Fotocorriente generada en los pisos de la torre de luz en función de la temperatura registrada por los TMP-36. La variación se debe principalmente al cambio de la potencia óptica emitida por los LED que iluminan a los fotodiodos

Tabla 6-15. Parámetros del ajuste de la calibración térmica de la torre de luz

Parámetros del Ajuste	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	Piso 7	Piso 8
m [nA/°C]	9,39	8,08	8,34	9,25	8,99	8,55	8,64	8,46
b [μA]	1,10	0,986	1,09	1,09	1,06	1,03	1,08	1,07

*Nota:* Origen térmico en 22,7 °C

Tabla 6-16. Errores estadísticos del ajuste de los parámetros de la calibración térmica de la torre de luz

Errores del Ajuste	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	Piso 7	Piso 8
Δm [pA/°C]	5,53	3,33	3,60	5,04	5,03	4,77	5,01	5,59
Δb [pA]	91,5	56,6	61,2	85,7	85,8	79,3	84,1	96,9

*Nota:* Estos errores estadísticos expresados de forma relativa al valor del parámetro son inferiores al 1%  
Origen térmico en 22,7 °C

Se va ahora a estudiar, si la radiación acumulada en los sensores afecta a su comportamiento térmico. Para ello se comparan los resultados de unos pisos con otros, pues no todos los pisos han sido irradiados hasta los mismos niveles. El piso primero ha sido el más irradiado, ya que ha recibido los protones de todas las energías y por ello ha sufrido más DD. Sin embargo, los pisos más apantallados solo han recibido los protones superiores a su energía umbral. En Fig. 6-24, que representa los valores de los parámetros del ajuste en función del piso, se puede observar que no hay ninguna tendencia de estos parámetros en función del piso que ocupan, es decir, no se aprecia una clara dependencia con los DD.

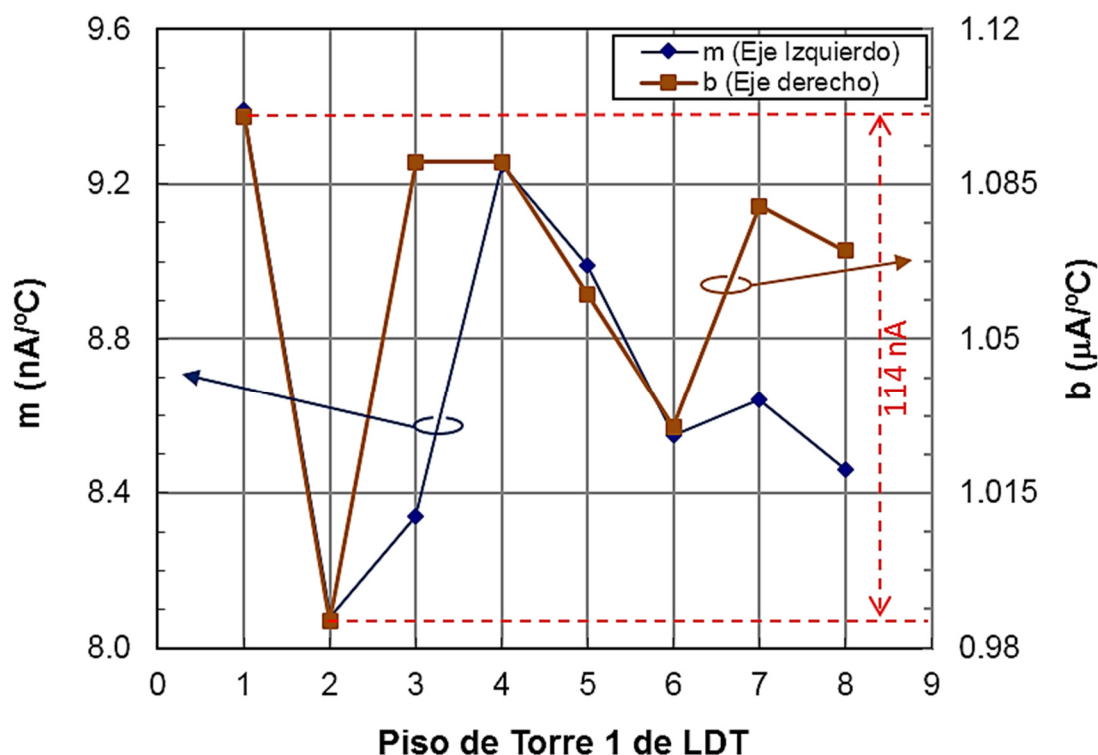


Fig. 6-24. Representación gráfica de los valores de los parámetros del ajuste lineal de la dependencia térmica de los pisos de la torre de LED

Es cierto que se esperaba, que al menos el término independiente, fuera inferior en los pisos más dañados, ya que la potencia de emisión de un LED es inversamente proporcional a los DD sufridos. La dispersión en el valor de origen del parámetro  $b$  entre los diferentes pisos, que alcanza 114 nA, enmascara totalmente este efecto que es del orden de 12,5 nA (Tabla 6-17). Para observar este efecto de 12,5 nA, se necesitaría una referencia del estado inicial de cada piso, para evaluar cuánto ha cambiado desde ese estado inicial.

Tabla 6-17. Diferencia máxima entre pisos para el término independiente del ajuste térmico y valor máximo esperado en el decaimiento de este mismo parámetro tras una irradiación como la realizada en la calibración

Parámetro	Valor
Diferencia máxima de $b$ entre pisos.	114 nA
Cambio máximo esperado en $b$ durante la irradiación	12,5 nA

En cuanto a la variación en la pendiente, no se tienen datos al respecto, pero tendría que ser mayor que 1 nA/°C, para que pudiera ser observable con la dispersión observada entre unos pisos y otros con este método.

### 6.4.2 Torre de oscuridad

Los datos de la corriente de oscuridad de los fotodiodos de la torre de oscuridad han sido ajustados a la siguiente expresión:

$$I(A) = \underbrace{A_0}_{Offset} + \underbrace{A_1 \cdot e^{(R_o(T-25.7))}}_{Corriente\ de\ oscuridad} \quad 6-2$$

en donde:

- $I(A)$  es la corriente medida en oscuridad.
- $T$  es la temperatura, en grados centígrados, registrada por el sensor TMP-36 pegado en la parte trasera del fotodiodo del piso bajo estudio.
- $R_o$  es un parámetro que determina la sensibilidad a la temperatura de la corriente de oscuridad. Tiene un valor inferior a 1, siendo la sensibilidad a cambios térmicos mayor cuanto más cercano a 0 es este parámetro. Se puede relacionar con otro parámetro que expresa el número de grados centígrados necesarios para que la corriente de oscuridad se duplique.
- $A_o$  es un *offset* introducido por la cadena electrónica.
- $A_1$  es la corriente de oscuridad del fotodiodo a 25,7°C.
- $A_o + A_1$  es la corriente medida en oscuridad a una temperatura de 25,7°C.

Esta ecuación está formada por dos términos: uno que modela la corriente de oscuridad del fotodiodo, y el otro, un *offset*, que podría estar vinculado con la electrónica de acondicionamiento y digitalización de las señales.

Este ajuste se realizó desplazando las temperaturas  $25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pues esa fue la media de la temperatura registrada por los TMP-36 de la torre de oscuridad, durante la calibración de radiación.

La Fig. 6-25 representa la evolución de la corriente de oscuridad de todos los pisos de la torre de oscuridad, la tabla 6-18 muestra los parámetros del ajuste exponencial (ecuación 6-2) y la Tabla 6-19 sus errores estadísticos.

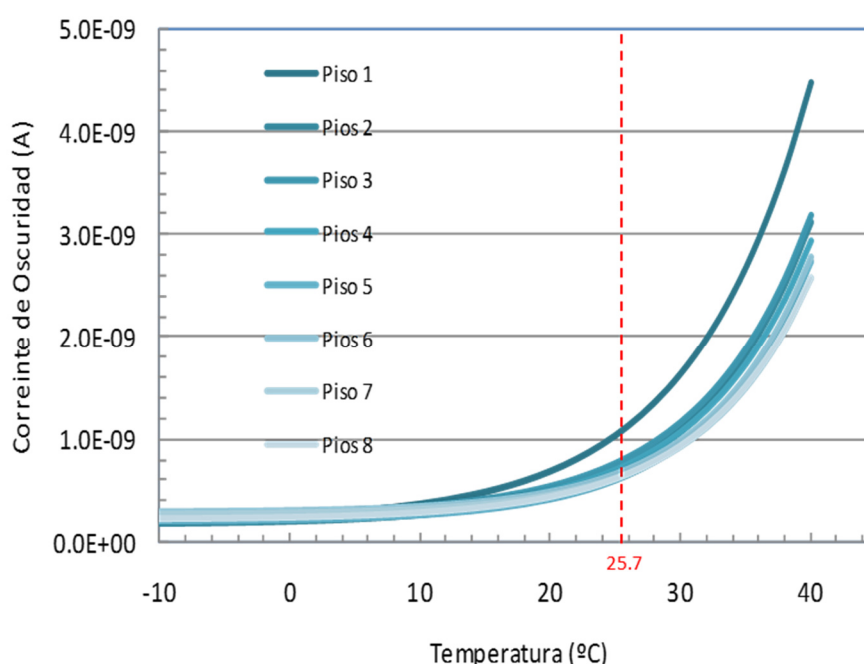


Fig. 6-25. Corriente medida sin iluminación en los fotodiodos de los pisos de la torre de oscuridad en función de la temperatura

Tabla 6-18. Parámetros del ajuste de la calibración térmica de la torre de oscuridad

Parámetros del Ajuste	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	Piso 7	Piso 8
$A_0$ [pA]	212	174	271	237	197	281	273	226
$A_1$ [pA]	887	565	537	496	439	404	383	426
$R_0$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	0,10931	0,11505	0,1177	0,11822	0,12242	0,12703	0,12513	0,11902
Duplica cada [ $^{\circ}\text{C}$ ]	6,34	6,02	5,89	5,86	5,66	5,46	5,54	5,82

*Nota:* Origen térmico en  $25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla 6-19. Errores estadísticos de los parámetros del ajuste de la calibración térmica de la torre de oscuridad

Errores del Ajuste	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5	Piso 6	Piso 7	Piso 8
$\Delta A_0$ [fA/°C]	849	572	431	432	338	305	305	372
$\Delta A_1$ [fA]	1120	831	593	612	482	447	446	525
$\Delta R_0$ [ $\mu^\circ\text{C}^{-1}$ ]	284	287	266	280	267	272	278	287
$\Delta \text{Duplica cada } [^\circ\text{C}]$	0,0165	0,0150	0,0133	0,0139	0,0124	0,0117	0,0123	0,0141

*Nota: Estos errores estadísticos expresados de forma relativa al valor del parámetro son inferiores al 1%  
Origen térmico en 25,7 °C*

En la Fig. 6-26 se muestran los dos parámetros que representan el valor de la corriente medida a 25,7°C ( $A_0$  y  $A_1$ ):

- $A_0$  es un *offset* y se ha considerado independiente de la fluencia recibida, pues no muestra ninguna dependencia con el piso. Debido a la dispersión de datos entre unos pisos y otros, esta dependencia podría estar enmascarada.
- $A_1$  es **la corriente de oscuridad del fotodiodo**, que sí muestra una dependencia clara con el piso. Los más irradiados muestran una corriente de oscuridad sensiblemente mayor que la de los pisos más apantallados (situados en la parte trasera de la torre).

En la gráfica de la Fig. 6-27 se muestran los dos parámetros que representan la sensibilidad a la temperatura de la corriente de oscuridad, por un lado está el  $R_0$  del ajuste, y por el otro la variación de temperatura (°C) necesaria para que la corriente de oscuridad se duplique. En ellos se observa una cierta dependencia en función del piso y por este motivo se concluye que **la sensibilidad a la temperatura de la corriente de oscuridad depende de los DD** sufridos y que, por tanto, **la calibración térmica aquí realizada no será válida para todo el tiempo de explotación de LDT**. Por ello tendrán que recalibrarse los efectos térmicos periódicamente en órbita.



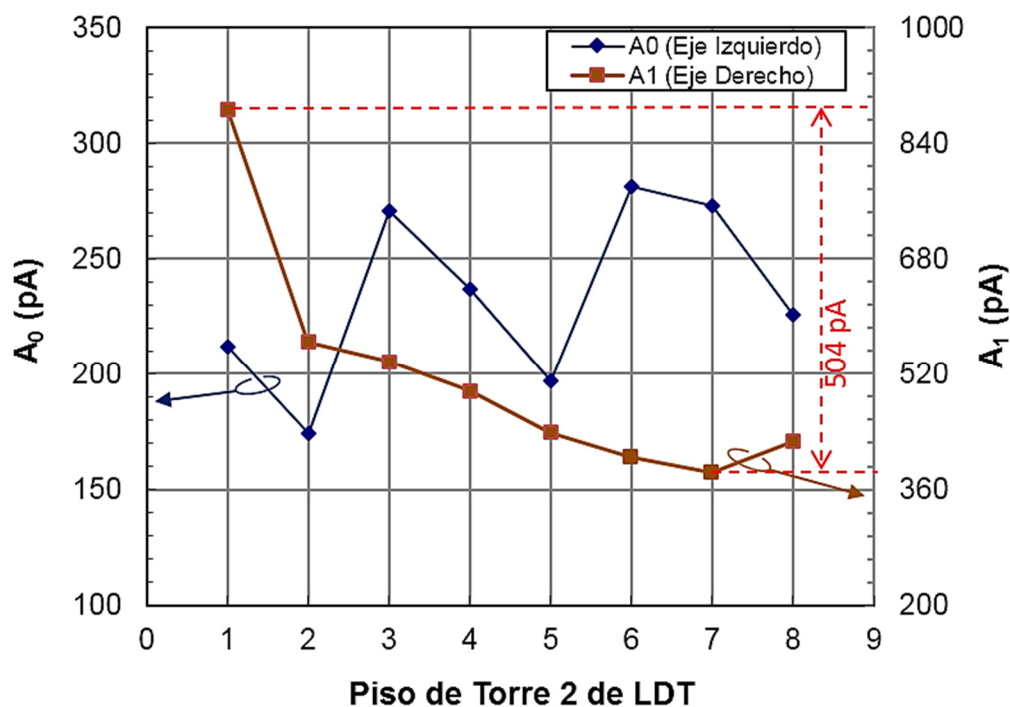


Fig. 6-26. Representación gráfica de los valores del *offset* ( $A_0$ ) y de la corriente de oscuridad a 25.7°C ( $A_1$ ) del ajuste exponencial de la dependencia térmica de los pisos de la torre de oscuridad

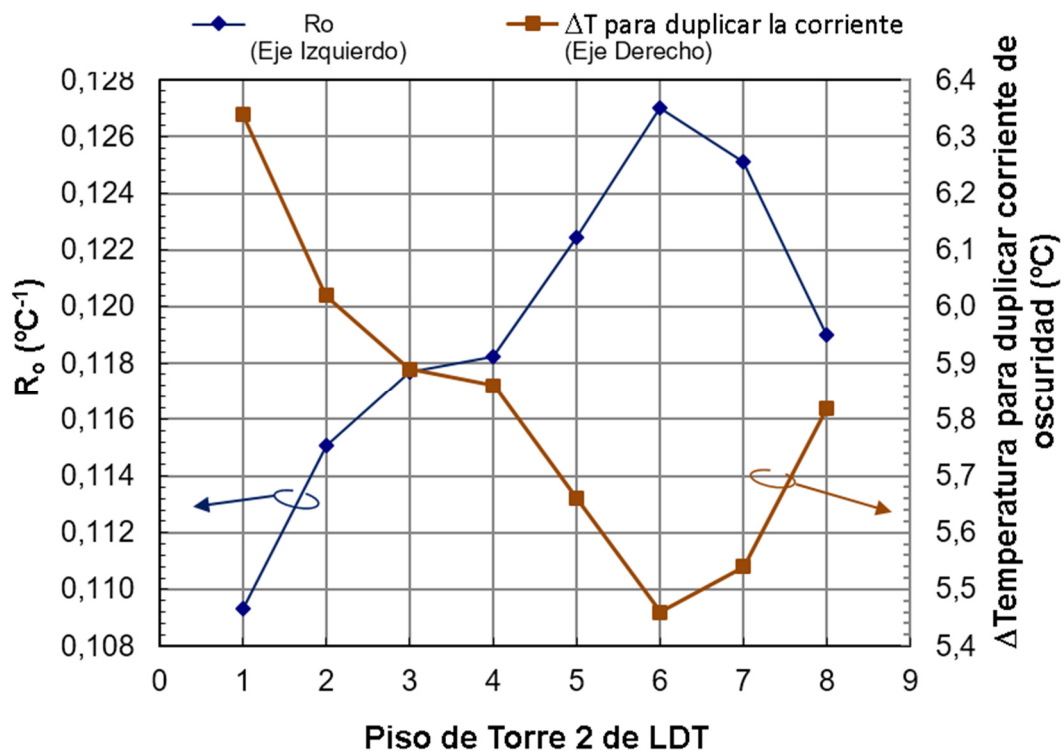


Fig. 6-27. Representación gráfica de los valores de la sensibilidad a los cambios térmicos de la corriente de oscuridad de los pisos de la torre de oscuridad

### 6.4.3 Sensor de temperatura TMP 36

El sensor de temperatura no ha sido calibrado con la temperatura. No se necesita conocer con precisión la temperatura de LDT, ni de NANOSAT, ni tan siquiera de los fotodiodos y LED. Como se ha comentado, solo se necesita conocer con precisión la relación entre la señal del TMP-36 y la señal medida por LDT. Pero lo que sí es importante, es que el TMP-36 no cambie su respuesta con el tiempo, y por eso es necesario asegurar que no se degrada con la radiación. En caso contrario, la corrección térmica podría verse afectada. Ya se había comprobado que la degradación de los TMP-36 es despreciable hasta los  $\sim 7$  krad de TID [Jim13] (Fig. 6-28), pero no se tenía ningún dato sobre si su señal sufre efectos transitorios por ionización. Así pues, se aprovecharon las calibraciones de LDT en el acelerador de  $p^+$ , para realizar, no solo una irradiación activa en los TMP 36 y ver si el flujo de protones alteraba su medida, sino también para corroborar que la dosis acumulada era despreciable.

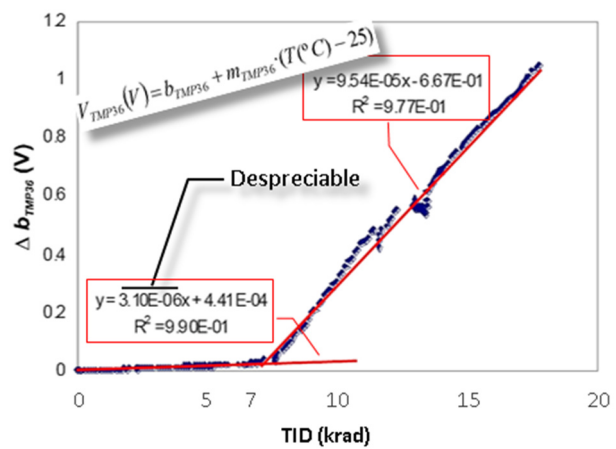


Fig. 6-28. Respuesta de un TMP 36 vs. la TID [Gon13]

Detalles de los resultados se pueden encontrar en el Apéndice C, en el que se demuestra que estos TMP-36 no sufren alteración en su señal por ionización, y que la degradación por la dosis acumulada es también despreciable, al menos en las condiciones de trabajo del instrumento, en la órbita LEO de NANOSAT. En la Tabla 6-13 se resumen las características encontradas en relación a estos efectos.

Tabla 6-20. Características de la matriz de sensibilidad al flujo

	Torre de oscuridad	Torre de luz	Ambas torres
Efecto	Transitorio de ionización		DD
Dispositivo	TMP-36	TMP-36	TMP-36
Simetría de la matriz	Tendencia triangular	Ninguna	Ninguna
Diferencia entre elementos del triángulo superior e inferior	Menos de 1 orden de magnitud	Ninguna	Ninguna
Elementos del triángulo inferior	No despreciables	-	-
Elementos de transición	-	-	-
Sensibilidad media	$(630 \pm 1100) \times 10^{-9}$ [°C/(cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )]	$(12 \pm 80) \times 10^{-9}$ [°C/(cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )]	-
Factor de daño medio	-	-	$(1,82 \pm 2,2) \times 10^{-9}$ [°C/cm <sup>-2</sup> ]
Observaciones	Valores mayores en los pisos frontales especialmente el piso 1		El comportamiento es igual en ambas torres
	Efecto despreciable en LDT	Efecto despreciable en LDT	Efecto despreciable en LDT

## 6.5 Conclusiones

Se resumen a continuación las conclusiones obtenidas durante la determinación de las energías umbral, y en los tres tipos de calibraciones realizadas sobre los sensores de LDT.

### A. Energía umbral

El piso 7 ha quedado apantallado casi igualmente por todas direcciones, siendo la energía umbral media de  $\sim 75$  MeV.

### B. Calibración de la los efectos transitorios de ionización o flujo de protones

**Fotodiodos (S5107).** Las matrices de la sensibilidad de los fotodiodos al flujo de protones de ambas torres, son similares: simetría triangular, elementos del triángulo inferior despreciables respecto al triángulo superior y once elementos de transición.

La **torre de oscuridad** tiene un rango dinámico inferior, pero más resolución, y por eso es adecuada para medir los flujos bajos. La **torre de luz** tiene un rango dinámico

mayor, aunque menor resolución, será la que **se utilizará cuando la torre de oscuridad saturate** por exceso de flujo.

**LED (S9338).** Se comprobó que **los LED no sufrían efecto transitorio** por ionización directa que pudiera alterar la medida o que pudiera ser usado para medir el entorno de radiación.

### C. Calibración de los efectos por DD o fluencia acumulada:

**Fotodiodos (S5107).** La matriz de los factores de daño de la corriente de oscuridad tiene simetría triangular, sus valores **son adecuados** para extraer información del entorno de radiación **usados individualmente**, pero debido al valor de sus incertidumbres es probable que **no se pueda resolver el sistema con suficiente precisión**.

**LED (L9338).** En el caso del factor de daño de la potencia de emisión de los LED no se encuentra simetría triangular. La distorsión de la matriz podría venir de efectos térmicos, o de algún funcionamiento anómalo inducido por el ruido electromagnético propio de los aceleradores de protones. También existe la posibilidad de que estén influyendo efectos de daños por ionización de partículas secundarias. No podrá usarse la información de todos los pisos, ni de todas las energías con las que se ha calibrado, pero **hay elementos para extraer información** del entorno de radiación, usándolos de forma individual y **no como sistema de ecuaciones**.

### D. Calibración térmica

La dependencia térmica observada en las señales de LDT implica, como ya se sabía, que **será necesario corregir térmicamente los datos** obtenidos durante la explotación del instrumento en vuelo.

Como la radiación recibida sobre LDT afecta a **la dependencia térmica**, la calibración en temperatura aquí descrita, no será aplicable durante toda la misión, **tendrá que ser recalibrada periódicamente en vuelo**.

**Los efectos que la radiación produce en los TMP-36 son despreciables** para los niveles que se esperan a bordo de NANOSAT, por este motivo estos sensores térmicos son aptos para usarse como sensores de temperatura en LDT.



## 7 Preparación de la explotación

*Se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta durante la planificación de la explotación de LDT. Se dan los detalles del entorno de radiación y de la órbita de NANOSAT que han influenciado, unas veces de forma positiva y otras de forma negativa, este plan de explotación, las activaciones de LDT, los análisis y los resultados.*

*También se muestran los resultados de las simulaciones que después se usarán para comparar las medidas de LDT.*

*Por último se describen los diferentes puntos por los que pasan los datos desde que LDT los adquiere hasta que están listos para su análisis.*

## 7.1 Introducción

La explotación de LDT se ha dividido en tres fases:

- **Planificación** de las activaciones: para lo que se tienen en cuenta aspectos tales como la órbita, el entorno de radiación esperable, y las particularidades de operación del satélite y del resto de experimentos.
- **Operación:** es la fase en la que se activa LDT y se obtienen los datos del instrumento.
- **Análisis:** que ha sido realizada de forma continua desde la recepción de los primeros datos.

En este capítulo se van tratar la fases de operación y planificación. Para describir estas dos fases el capítulo ha sido dividido en tres secciones. La primera trata los aspectos de la órbita de NANOSAT y su entorno de radiación (§7.2) para, posteriormente, poder centrarnos en los detalles que han condicionado la estrategia de activación (§7.3). Finalmente se describirá como preparar los datos (§7.4) para su posterior análisis, que será tratado en el capítulo 8.

## 7.2 Entorno de radiación de NANOSAT-1B

### 7.2.1 La órbita

La órbita de NANOSAT es una órbita baja (LEO – Low Earth Orbit) polar, de baja excentricidad y de tipo heliosíncrona. Esto afecta a ciertos aspectos que influyen directamente en como operar y analizar los datos de LDT:

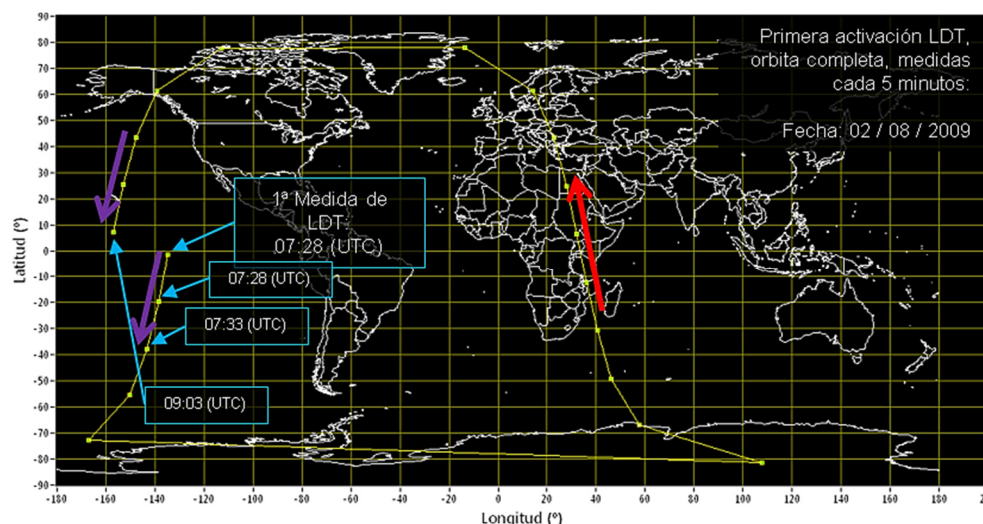
- Órbita LEO de ~ 650 km de altura media. Este tipo de órbita está protegida de la radiación por el campo magnético de la Tierra. Solo en la zona conocida como Anomalía del Atlántico Sur (AAS) esta pantalla se deforma y el satélite queda expuesto a la radiación. En esta zona, los *cinturones de Van Allen* se acercan un poco más a la Tierra y aparece una gran concentración de partículas energéticas (§1.1.1), sobre todo  $p^+$  y  $e^+$ .
- Órbita polar de 98,1° de inclinación. El ángulo de inclinación es el ángulo que forma el eje de giro de la órbita del satélite con el de rotación de la Tierra. Gira de Norte a Sur y viceversa, aunque no pasa exactamente por los polos. La

combinación de la rotación de la Tierra con el movimiento orbital del satélite ayuda a que el satélite sobrevuele casi todas las latitudes y longitudes del planeta.

- **Órbita heliosíncrona.** La principal característica de este tipo de órbitas es que el satélite siempre pasa a la misma hora solar por cada latitud del planeta. Esto se traduce en que el satélite sobrevuela cada zona del planeta a la misma UTC (Tiempo Universal Coordinado). En realidad pasa dos veces por cada zona: una de Sur a Norte (cuando esa cara de la Tierra está iluminada por el Sol) y otra de Norte a Sur, unas 12 horas después (cuando esa cara está en eclipse). Esto facilita seleccionar las zonas en las que se quiere medir fijando simplemente la hora (UTC) de activación y la duración de la misma.
- **Órbita con cierta excentricidad,** en la que la el satélite pasa por diferentes altitudes (entre ~588 km y ~708 km). Si no fuera excéntrica, la órbita tendría una altura constante y no permitiría a LDT obtener información de diferentes “capas”. Además, posee una cierta precesión en la altura, por lo que a lo largo de varios meses, el satélite pasa sobre todos los puntos geográficos y a diversas alturas. Realmente el satélite barre el volumen comprendido entre dos esferas concéntricas de 588 km y 708 km, exceptuando dos volúmenes cilíndricos justo encima de los polos.

Una órbita completa dura aproximadamente 97 minutos, y por ello, en un día, NANOSAT da aproximadamente 15 vueltas enteras a la Tierra. En la Fig. 7-1 se representan las primeras medidas de LDT, las cuales cubrieron una órbita completa. Las medidas fueron realizadas entre las 7:23 y las 9:08 (UTC – Tiempo Universal Coordinado) del día 2 de agosto de 2009, con una frecuencia de 5 minutos. La posición de cada medida está representada con un punto, y la trayectoria del satélite con una línea recta uniendo cada punto. Se señala el sentido de avance del satélite con flechas en color morado, en el caso de tratarse de una posición en el que el satélite está en eclipse, y con flechas rojas si está fuera de la zona de eclipse.





Nota: Las flechas señalan el sentido de avance del satélite. En morado si está en eclipse, en rojo si está iluminado por el Sol

Fig. 7-1. Trayectoria seguida por NANOSAT-1B y los puntos de activación de LDT durante su primera activación el 02/08/2009 cuatro días después del lanzamiento

Como puede verse, la órbita no empieza y termina en el mismo punto del planeta. Hay una traslación, cada órbita está desplazada unos grados al oeste respecto de la anterior. Este efecto se produce por la rotación de la Tierra. Idealmente, en una órbita heliosíncrona, el plano de rotación del satélite permanece constante respecto a la línea que une el Sol con la Tierra, y la rotación de la tierra produce esta traslación.

El ángulo que forma el plano de la órbita del satélite con la línea de unión entre el Sol y la Tierra, determina la hora solar por la que el satélite pasa por cada latitud. Se puede definir la hora solar a la que pasa el satélite por el ecuador de Sur a Norte como *hora de la órbita*. Las órbitas heliosíncronas tienen la propiedad de que esta hora es aproximadamente constante. Sin embargo tienen una cierta deriva, y tras varios años, si no se corrige el efecto, tienden a decaer a una órbita de las 18 h o a una de las 6 h dependiendo de ciertas condiciones iniciales. En NANOSAT se ha encontrado que esta deriva, que no se corrige, es de aproximadamente  $7^\circ$  por año.

Como curiosidad, decir que este tipo de órbitas son las elegidas para los satélites de observación de la Tierra, pues así las imágenes que se obtienen de una misma zona, son siempre bajo las mismas condiciones de iluminación solar.

En la Fig. 7-2 se representan dos órbitas consecutivas del 19/01/2010. La primera de las dos órbitas mostradas empieza con la medida de las 13:00 (UTC), y en ella se marcan en azul algunos de los puntos correspondientes a las medidas de LDT. La segunda se inicia sobre las 14:38 (UTC), y algunas medidas de LDT de esta segunda órbita se marcan en rojo. En esta ocasión la frecuencia de medida fue de 2 minutos.

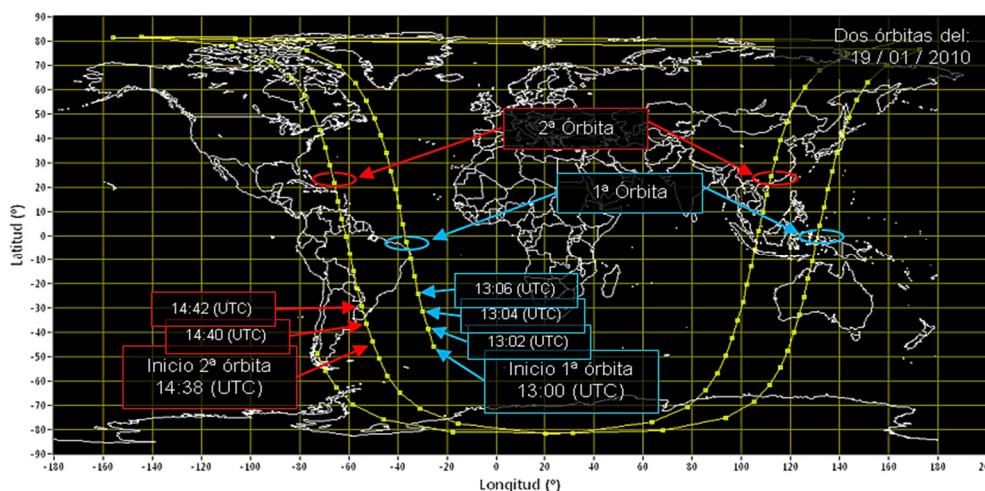
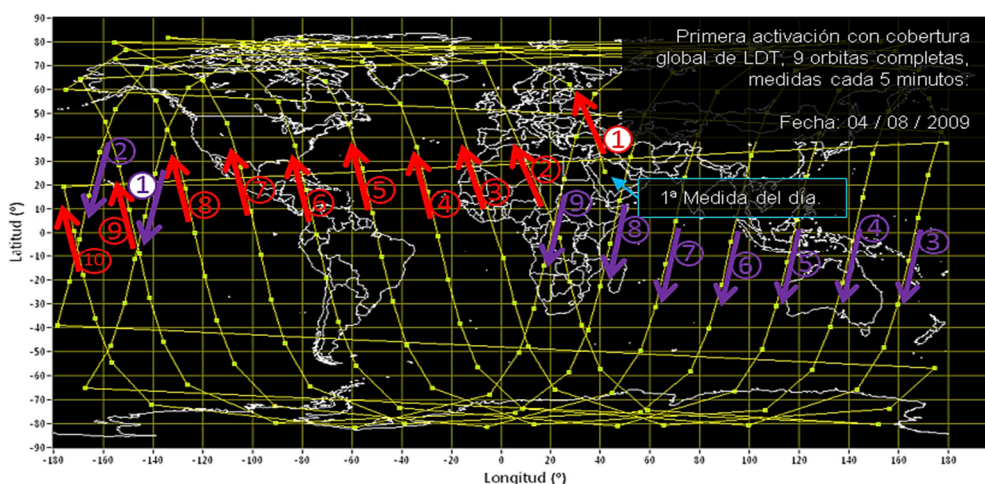


Fig. 7-2. Activaciones de frecuencia 2 minutos de dos órbitas consecutivas de NANOSAT-1B

En un periodo de 12 horas, NANOSAT, habrá dado unas 7 órbitas a la Tierra, recorriendo de Este a Oeste toda la superficie del planeta: la mitad de él con pases orbitales de Sur a Norte, y la otra mitad con pases de Norte a Sur. En la Fig. 7-3 se representan 14,5 horas correspondientes a unas 9,5 órbitas. El sentido y dirección del satélite está marcado con flechas rojas y moradas. Las flechas rojas corresponden al sentido de avance de Sur a Norte, el que se produce fuera de eclipse, y las moradas corresponden al caso de avance de Norte a Sur, en eclipse. Si se representasen las órbitas correspondientes a 24 horas, existiría una flecha roja y una morada en cada zona del planeta, en vez de la mitad en rojo y la otra mitad en morado. En esta figura se pone, al lado de cada flecha, el número de órbita correspondiente, y se marca el número 1 con fondo blanco, para resaltar la posición de esa primera órbita.



*Nota: Las flechas señalan el sentido de avance del satélite. En morado si está en eclipse, en rojo si está iluminado por el Sol. El número encerrado en una circunferencia indica la órbita representada, desde la primera (1) la décima (10)*

Fig. 7-3. Representación de las medidas realizadas por LDT durante casi 9,5 órbitas en un intervalo de unas 14,5 horas. Los números identifican cada una de las órbitas, y las flechas el sentido de avance del satélite. En rojo las zonas diurnas, en morado las zonas en eclipse

Las órbitas equivalentes de dos días consecutivos, no pasan exactamente por los mismos puntos, se desplazan unos pocos grados al Oeste, por lo que a lo largo de varios días se barre toda la superficie del planeta. El tiempo que se tarda en volver a un mismo punto geográfico se conoce con el nombre de *tiempo de revisita*<sup>15</sup>. En el caso de NANOSAT es de ~ 6 días. En las Fig. 7-25 y Fig. 7-26 (más adelante) se mostrará este efecto claramente.

La altura de la órbita, al ser una órbita ligeramente excéntrica, no es constante. En la Fig. 7-4 se muestra la altura a lo largo de 9 órbitas adquiridas el 04/08/2009.

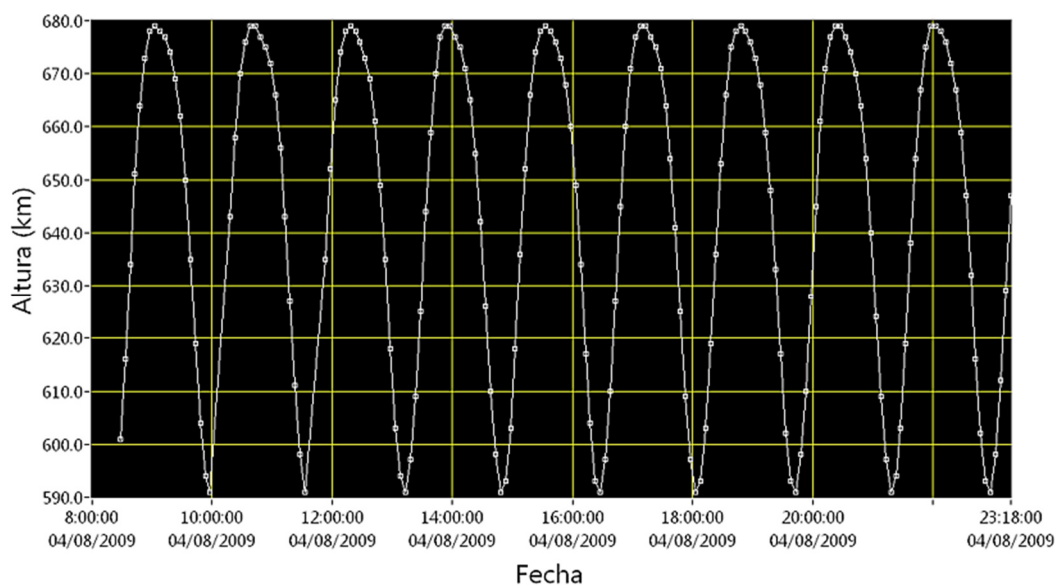


Fig. 7-4. Representación de la altura del satélite durante 9 órbitas del día 04/08/2009

La altura máxima y mínima del satélite durante una órbita completa depende del día, ya que no es constante para todos los días ni para todas las órbitas. La Fig. 7-5 muestra la altura de las órbitas de las activaciones de los 3 últimos meses de 2010. Además, el máximo y el mínimo no coinciden siempre en la misma latitud, ni longitud. Esto hace que el paso sobre un punto de la Tierra se realice a una altura distinta cada vez, y que se pueda aprovechar para caracterizar el ambiente de radiación a diferentes alturas. La revisita

<sup>15</sup> El *tiempo de revisita* se conoce en los satélites de observación de la tierra como al tiempo que necesita el satélite para volver a *observar* una zona concreta de la superficie de la tierra. Depende tanto de la órbita, como del campo de visión del instrumento que usa para *observar*. En LDT, sin embargo, se refiere a sobrevolar un área cuadrada de lado 2° (en coordenadas terrestres latitud-longitud)

orbital, entendida como sobrevolar el mismo punto<sup>16</sup> y hacerlo a la misma altura<sup>17</sup>, es de < 5 meses, exceptuando algunas zonas concretas, que puede llegar a los 10 meses.

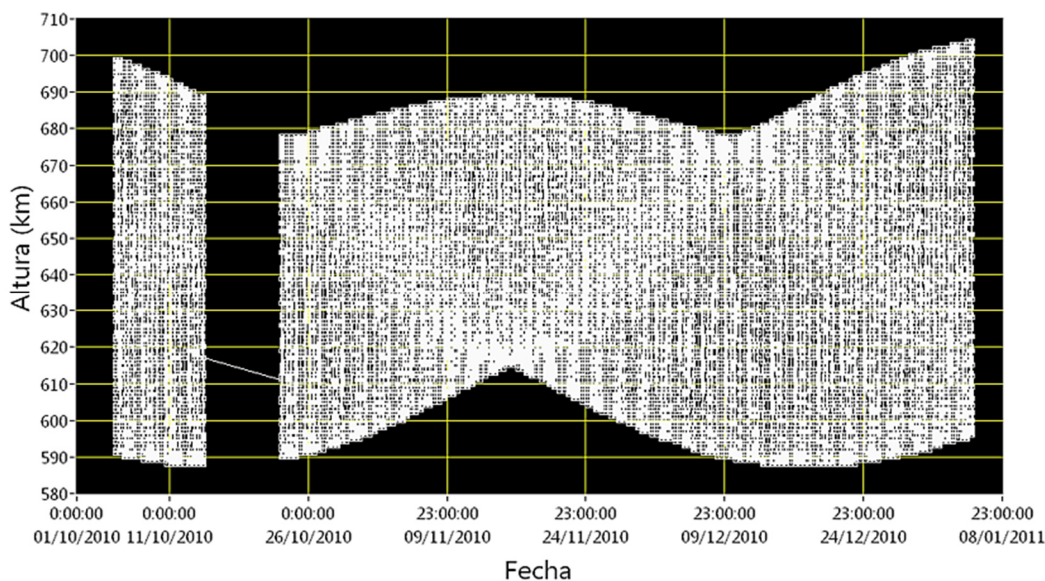


Fig. 7-5. Altura de NANOSAT-1B durante las activaciones de los 3 últimos meses de 2010

La altura orbital disminuye lentamente a lo largo del tiempo. Durante los 5 años de explotación de LDT, el decaimiento de la altura media de la órbita ha sido de unos 10 km. Este efecto se aprecia en la Fig. 7-6, que representa la altura media mensual de la órbita de NANOSAT, desde su lanzamiento hasta octubre de 2014. Esto tiene un efecto directo sobre la radiación recibida por el satélite, pues a menor altura, menos radiación.

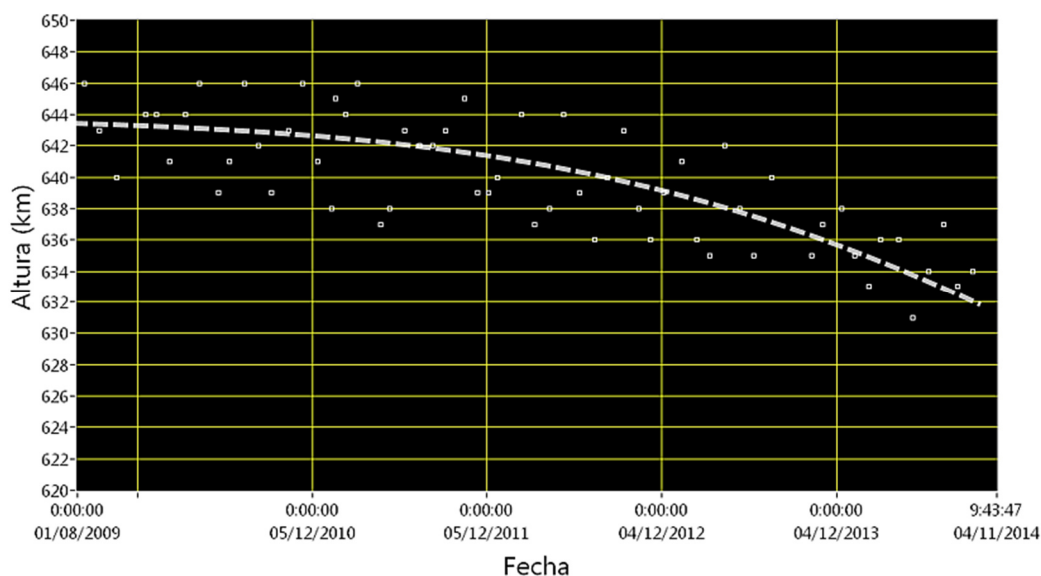


Fig. 7-6. Altura media mensual de NANOSAT-1B desde su lanzamiento hasta octubre de 2014

<sup>16</sup> Con una precisión de 1° (en coordenadas terrestres latitud-longitud)

<sup>17</sup> Con una precisión de 1 km



El satélite, en cada órbita, pasa de estar iluminado por el Sol a estar en eclipse. Esto provoca que su temperatura esté continuamente oscilando entre la temperatura máxima que alcanza al final de la zona de iluminación, y la mínima en la zona de eclipse. Estas excursiones térmicas modifican la temperatura de todos los componentes del satélite, y por ello afectan a LDT y sus señales. Han sido aprovechadas para calibrar la dependencia con la temperatura de LDT y optimizar las correcciones térmicas. Las variaciones de temperatura no son constantes, dependen de factores como la rotación sobre sí mismo del satélite o la época del año. Durante la explotación de LDT se han registrado excursiones de entre 2 °C y 10 °C en los distintos piso del instrumento. La Fig. 7-7 muestra la temperatura del piso 3 de la torre de oscuridad durante la activación del 04/08/2009.

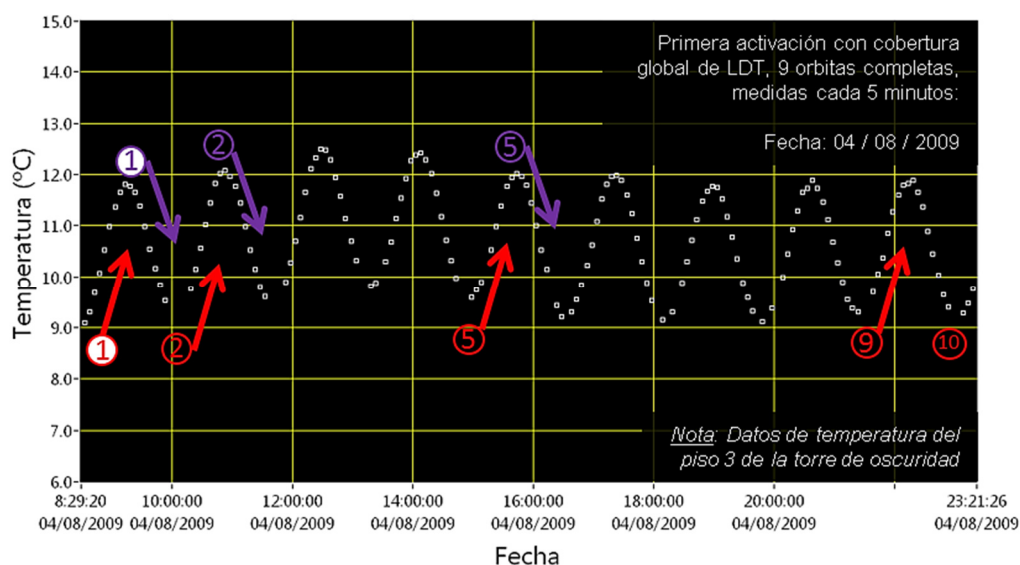


Fig. 7-7. Temperatura del piso 3 de la torre de oscuridad durante la primera activación con cobertura global el 04/08/2009

La órbita de un satélite queda definida por sus parámetros orbitales, los cuales incluyen información de la posición y velocidad del satélite en un instante de tiempo determinado. Esta información se recoge en dos líneas de elementos conocidas como TLE (*Two Line Element*) (Fig. 7-8).

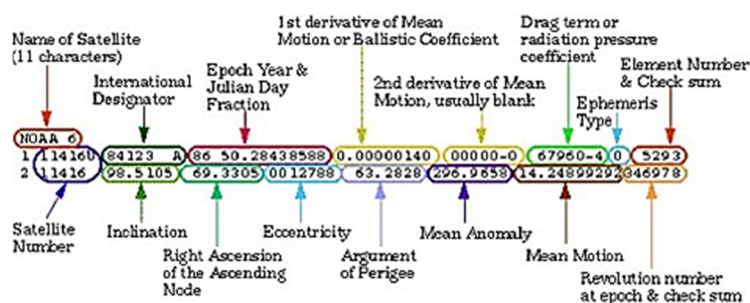


Fig. 7-8. Two-Line Element set – TLE. [NASA]

Diferentes observatorios mundiales monitorizan y miden los parámetros orbitales de todos los objetos y satélites en torno a la Tierra, y publican sus TLE con diferentes fines. La Tabla 7-1 recoge los TLE de NANOSAT, obtenidos de [SPA], en diferentes fechas de la explotación. Estos TLE han sido usados como entrada en las herramientas de simulación para la determinación del entorno de radiación. Para georreferenciar los datos generados por LDT, se han usado los TLE de cada día, así se consigue una mejor precisión.

Tabla 7-1. Datos orbitales (TLE) de NANOSAT-1B en diferentes fechas obtenidos de [SPA].

Fecha	TLE
01/08/2009	1 35685U 09041E 09213.53291155 .00000225 00000-0 36906-4 0 9994 2 35685 098.1293 107.8395 0064515 353.3516 006.6833 14.79202777 418
01/10/2009	1 35685U 09041E 09274.54851601 .00000032 00000-0 11612-4 0 9993 2 35685 098.1209 169.5014 0065162 154.4273 206.0187 14.79211772 9431
01/01/2010	1 35685U 09041E 10001.13813197 -.00000260 00000-0 -26189-4 0 1460 2 35685 098.1177 262.0005 0064033 219.5745 140.0801 14.79238135 22973
01/07/2010	1 35685U 09041E 10182.28244089 -.00000068 00000-0 -11833-5 0 3036 2 35685 098.1009 084.7409 0064558 357.6387 002.4523 14.79309994 49751
01/01/2011	1 35685U 09041E 11001.79978893 .00000254 00000-0 40294-4 0 4601 2 35685 098.0919 270.5571 0065437 120.9887 239.7751 14.79395309 77033
01/07/2011	1 35685U 09041E 11182.17627843 -.00000044 00000-0 18492-5 0 6133 2 35685 098.0821 092.0780 0063105 259.4654 099.9466 14.79555114103709
01/01/2012	1 35685U 09041E 12001.85374958 .00001283 00000-0 17141-3 0 7678 2 35685 098.0790 277.7880 0064305 024.2378 336.1892 14.79936019131012
01/07/2012	1 35685U 09041E 12183.37011954 .00000254 00000-0 39549-4 0 9216 2 35685 098.0745 100.4254 0063816 156.1339 204.2835 14.80251213157868
01/01/2013	1 35685U 09041E 13001.34886854 .00000673 00000-0 92344-4 0 793 2 35685 098.0790 285.5758 0062003 282.7874 076.6419 14.80599721185082
01/07/2013	1 35685U 09041E 13183.41563275 .00000446 00000-0 62981-4 0 2324 2 35685 098.0842 109.0521 0063713 054.8681 063.6762 14.80925317212027
01/01/2014	1 35685U 09041E 14001.43139861 .00000875 00000-0 11553-3 0 3804 2 35685 098.0964 293.6861 0062314 180.5396 301.6406 14.81377297239102
01/07/2014	1 35685U 09041E 14182.79323645 .00000670 00000-0 89103-4 0 5372 2 35685 098.1055 117.1385 0060047 315.5741 044.0662 14.82015474265951
01/01/2015	1 35685U 09041E 15001.06987770 .00001231 00000-0 15481-3 0 7023 2 35685 098.1256 302.9498 0061948 081.7208 279.1023 14.82653115293104

Para resumir, los tres aspectos clave a tener en cuenta de la órbita son:

- La excentricidad de la órbita se aprovecha para caracterizar el entorno de radiación en diferentes alturas (como se verá en el mapeo realizado de la AAS).

- Las excursiones térmicas entre la zona de eclipse y la diurna son utilizadas para la calibración térmica.
- El entorno de radiación de NANOSAT es relativamente fácil de simular<sup>18</sup> conociendo la órbita del satélite, esto ayudará a verificar si las medidas realizadas por LDT son coherentes.

### 7.2.2 Simulación del entorno de radiación

Para calcular el entorno de radiación de una órbita como la de NANOSAT, existen diferentes herramientas de simulación [SPE] [G4] y modelos del entorno [AP8] [AP9] [CRES] [SBP97], que se pueden emplear (§1.1.2). Estas simulaciones suelen hacerse para determinar la radiación esperada en una misión, y diseñar en función de este dato. Si se espera un elevado nivel de radiación, se hace necesario adoptar medidas para mitigar sus efectos, como son el empleo de componentes más robustos y/o incrementar los blindajes de protección.

Sin embargo, aquí se han desarrollado actividades de simulación para evaluar si la radiación medida por LDT coincide con lo esperado, y así validar su funcionamiento.

En el cálculo del entorno de radiación en una órbita LEO intervienen, principalmente, dos factores: la radiación atrapada (los cinturones de *Van Allen*) y los protones solares. Los protones solares no han sido contemplados, pues se sabe que no ha habido ningún evento solar importante, que haya contribuido de manera significativa a la dosis de radiación recibida por LDT (§8.3.4 según los datos de [GOES] y las propias medidas de LDT).

La radiación recibida por un componente en un satélite depende, además del entorno de radiación externo, de toda la masa que lo rodea y lo protege [Woo81]. Esta masa está formada por la estructura del satélite, sus paneles solares, sus elementos estructurales (incluidos tornillos, remaches, etc), las baterías, el resto de tarjetas electrónicas y componentes, el cableado, las cajas y carcasas que forman parte de otros instrumentos, el propio encapsulado del componente, y por supuesto, su blindaje. Cualquier elemento del satélite contribuye, en mayor o menor medida, a proteger de la

---

<sup>18</sup> La simulación es más fácil y fiable ahora con los nuevos modelos de protones atrapados que se han desarrollado para este tipo concreto de órbitas. Aunque la clave de la verificación de las medidas de LDT, está en combinar estas simulaciones con los datos experimentales de dos RadFet embarcados en el satélite, junto a LDT.

radiación. Por lo cual se debe simular con un modelo estructural 3D del satélite lo más detallado posible.

La simulación dentro del NANOSAT fue realizada por el *Área de segmento vuelo y gestión de proyectos* del INTA. Se utilizó Geant4 [G4] y un modelo estructural 3D de NANOSAT. Los resultados obtenidos se han comparado con dos dosímetros comerciales (dos RadFET de la firma Tyndall) embarcados en el satélite, junto a LDT. La simulación estimó la dosis acumulada durante el primer año de vuelo (expresada en TID y en TNID). Para la simulación, se usaron tanto el modelo de protones atrapados AP-8 como el AP-9, con objeto de mejorar el nivel de confianza en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos utilizando la estructura 3D eran solo válidos para el primer año de la explotación, debido a que la órbita de NANOSAT no es constante en el tiempo, y el uso de los TLE iniciales no es extrapolable a toda la duración de la misión. Por esta razón se decidió realizar otro tipo de simulación que sí fuera válida para los 5 años, usando año a año los TLE correspondientes. Para ello se aproximó la estructura del satélite por una esfera hueca homogénea de aluminio. Para fijar el tamaño de la esfera, hay diversas formas de calcular el espesor equivalente de la estructura 3D, pero los métodos analíticos tienden a calcular una esfera demasiado grande ([Lin06] y [Cal08]). Además, este espesor depende del entorno de radiación. Para evitar este efecto, y dado que se tienen los datos, tanto de las simulaciones con el modelo 3D, como de las medidas de los RadFet, el grosor de las paredes de esta esfera ha sido determinado por comparación con ellos.

Este apartado se ha dividido en cuatro partes: empezaremos describiendo la simulación realizada usando el modelo 3D del satélite (§1.1.1.1), para pasar a describir las simulaciones que hemos realizado usando como estructura la esfera hueca de aluminio (§1.1.1.2), posteriormente se discutirá la validación de los resultados de las simulaciones comparándolos con los dosímetros de referencia (§1.1.1.3), y por ultimo mostraremos los resultados aplicables a LDT (§1.1.1.4).

#### **1.1.1.1 Usando el modelo 3D de NANOSAT-1B**

Se han estimado el TID y el TNID acumulados durante el primer año de explotación, en las posiciones exactas en donde están ubicados los dos RadFET (que miden TID) y el instrumento LDT (que mide TNID). Se usaron los modelos de protones atrapados AP/AE-8 y AP/AE-9.



Los RadFET son de la marca Tyndall, uno tiene 1  $\mu\text{m}$  de *espesor de puerta*<sup>19</sup> y el otro 400 nm [Jak02], [Jak02a] y [Har04]. Información sobre la calibración que se realizó de estos RadFet para NANOSAT-1B puede ser encontrada en [Fer10].

Las siguientes figuras (Fig. 7-9, Fig. 7-10 y Fig. 7-11) muestran la ubicación de los sensores dentro del satélite.

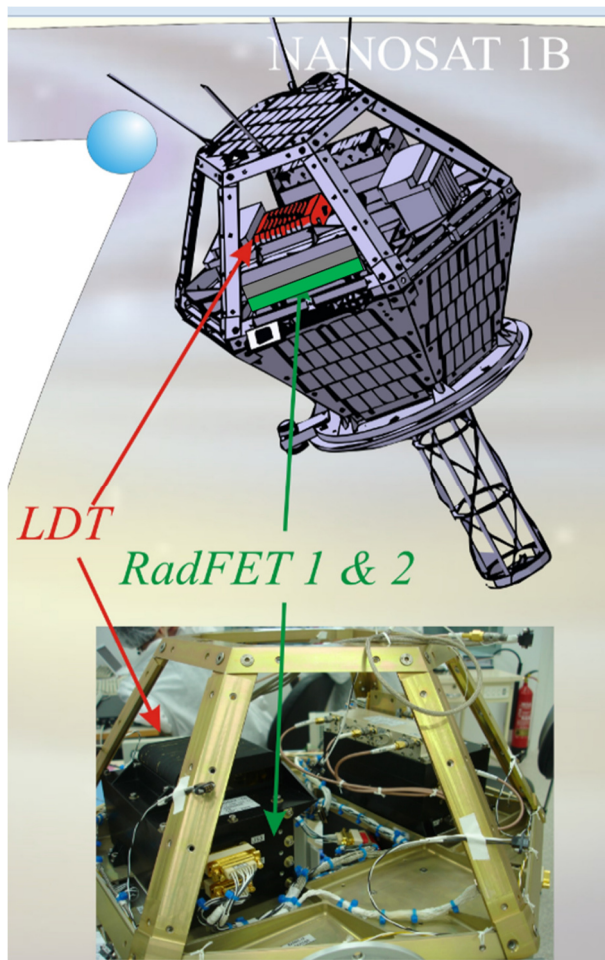


Fig. 7-10. Esquema y fotografía de NANOSAT-1B en las que se indican la posición de LDT y de la tarjeta con los RadFET [Jim10]

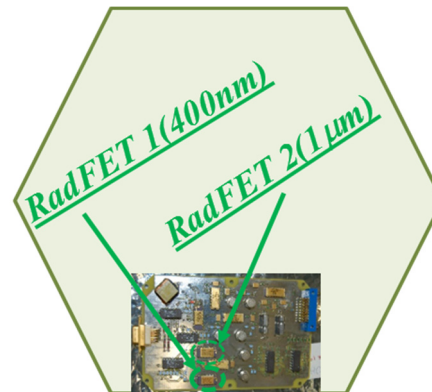


Fig. 7-9. Posición de los RadFET dentro de la caja de sensores en el llamado plano ecuatorial de Nanosat-1B

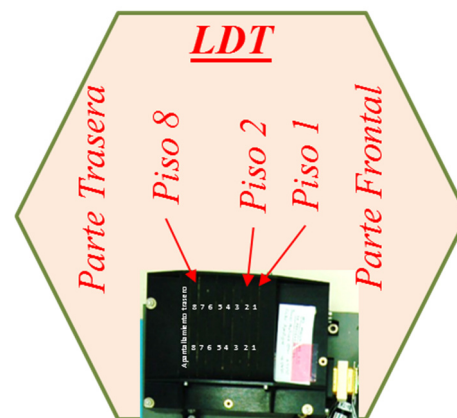


Fig. 7-11. Posición y orientación de LDT en el plano ecuatorial de NANOSAT-1B

El modelo 3D de la estructura del satélite usado en la simulación, no contemplaba toda la masa, ya que algunas piezas como la tornillería y el cableado no estaban incluidas. La estructura simulada tenía una masa de  $\sim 12$  kg, mientras que el satélite real tiene una

<sup>19</sup> El *espesor de puerta* del transistor en el que está basado un RadFET afecta a la sensibilidad a la radiación del mismo, pero le hace también más sensible a otros efectos como los térmicos. En NANOSAT-1B es la primera vez que se vuela un RadFET con una puerta de espesor tan ancho (1  $\mu\text{m}$ ) [Fer10], sin embargo el de 400 nm ha sido ya usado en otras misiones y se considera una buena referencia.

masa de ~ 24 kg. Esto quiere decir que un 50 % de la masa no estaba contemplada en la simulación, lo cual produjo una sobreestimación en la determinación de la radiación simulada, que además dependía de la posición del interior del satélite. En concreto, comparando este efecto en los RadFET y en LDT, se piensa que la sobreestimación será mayor en el caso de los RadFET. El blindaje de la estructura de LDT, de ~ 25 mm de aluminio, que rodea al instrumento, hacen que la estructura del satélite le afecte menos a LDT que a los RadFET. Los RadFET, aunque están muy apantallados por la estructura de LDT desde la parte de arriba, desde abajo y desde los laterales están protegidos casi solo por estructura del satélite. Por esta razón, la falta de la masa en la estructura del satélite usada para la simulación, afecta más a los RadFET.

No obstante, en el caso de los RadFET, como se dispone de los medidas obtenidas en órbita, la sobrestimación puede determinarse y se tomará como referencia para validar la respuesta de LDT, por comparación con la simulación.

#### **1.1.1.2 Usando la esfera hueca de aluminio**

Mediante el uso de la herramienta “SPENVIS” [SPE], se ha simulado la radiación acumulada, en función del tiempo, en el interior de una esfera hueca de aluminio, usando los parámetros orbitales de NANOSAT.

El tiempo de simulación ha sido dividido en 7 segmentos, en cada uno de ellos se ha usado el TLE correspondiente de los mostrados en la Tabla 7-1. La órbita de un satélite LEO, si no tiene sistemas de corrección orbital, como es el caso de NANOSAT, no es fija y tiende a cambiar ligeramente día a día, especialmente durante los primeros meses. Por eso, en esta simulación, los dos primeros segmentos temporales corresponden a periodos cortos, de 2 y 3 meses respectivamente, y el resto a periodos de un año entero.

Finalmente, se han obtenido los flujos espectrales medios de cada uno de estos segmentos. Se ha usado el modelo AP8 de protones atrapados (en su versión de “*mínimo solar*” o de “*máximo solar*” dependiendo del periodo temporal). La fluencia acumulada en un periodo de tiempo, se obtiene multiplicando el flujo obtenido por el tiempo transcurrido. En la Fig. 7-12 se muestra la fluencia integral y diferencial acumulada durante el año 2010 y durante el año 2014.

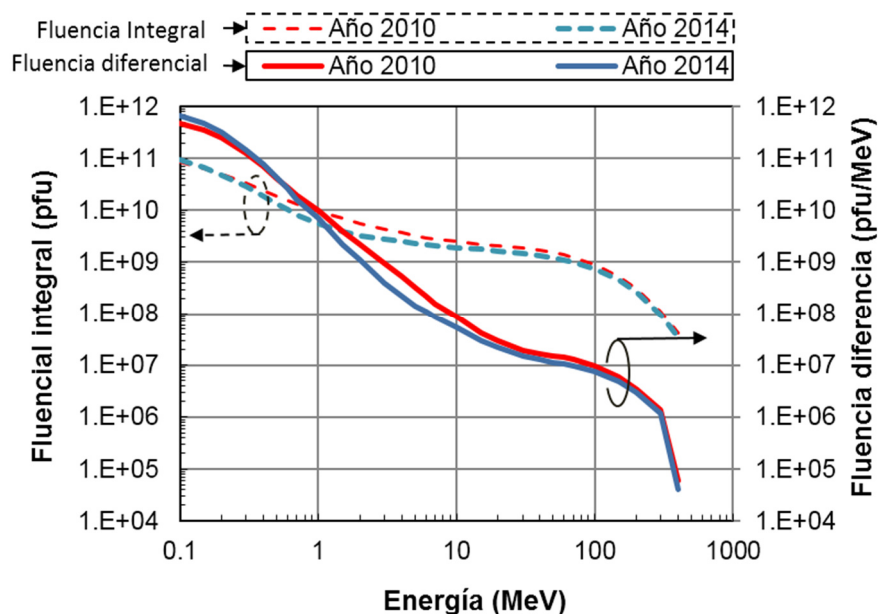


Fig. 7-12. Fluencia espectral integral y diferencial de protones atrapados acumulada durante el año 2010 y 2014, en mínimo y en máximo solar, respectivamente

El espectro de las fluencias mostradas corresponde al exterior del satélite. En el interior sería muy diferente, pues la cantidad de partículas de alta energía se reduce ligeramente, y el de baja energía se reduce drásticamente. Este efecto se aprecia en las figuras Fig. 7-13 y la Fig. 7-14, que muestran respectivamente la fluencia de protones de entre 0,1 MeV y 100 MeV y de entre 10 y 100 MeV acumulados durante el año 2010 en la órbita de NANOSAT-1B suponiendo distintos grosores de apantallamiento.

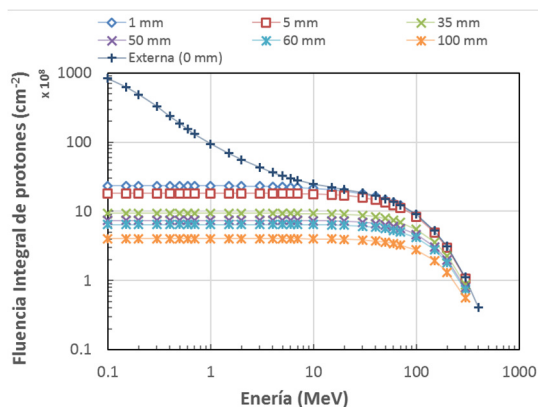


Fig. 7-13. Fluencia integral de protones (año 2010) para diferentes blindajes esféricos de aluminio

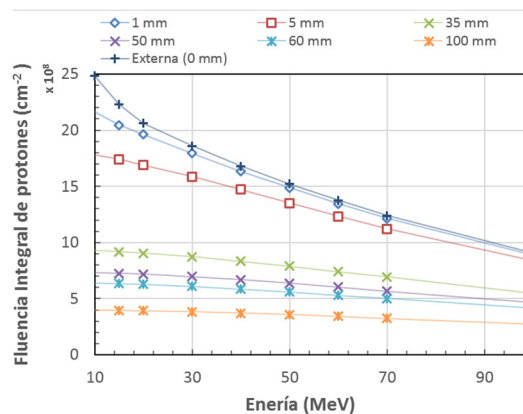


Fig. 7-14. Ampliación de la Fig. 7-13

Usando una geometría homogénea esférica, se han calculado los espectros de todos los segmentos en función del espesor de aluminio. A partir de estos datos se calcula tanto el TID como el TNID en función de esos mismos espesores de aluminio. El TID contabiliza también las contribuciones de los electrones y de las partículas secundarias

generadas en la interacción de los protones con la estructura del satélite (*Bremmstrahlung*). Los resultados de la dosis acumulada durante el año 2010 se muestran en la Fig. 7-15 (TID) y la Fig. 7-16 (TNID).

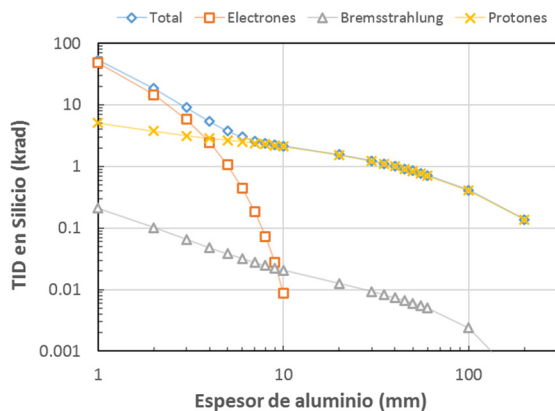


Fig. 7-15. TID año 2010

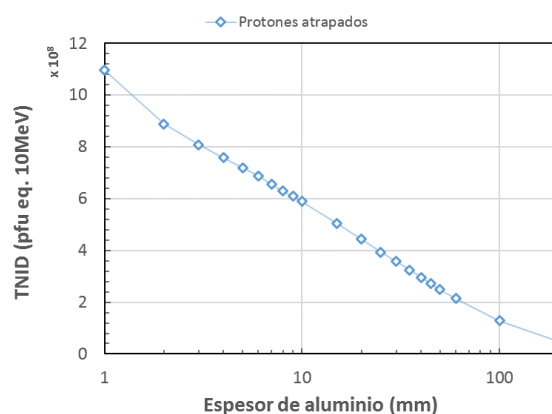


Fig. 7-16. TNID año 2010

Se aprecia como a partir de  $\sim 6$  mm de aluminio, la contribución de los electrones es un orden de magnitud menor que la de protones, por lo que en el interior de NANOSAT, en donde hay un blindaje cuyo espesor equivalente es mayor, será despreciables. La radiación secundaria (*Bremmstrahlung*) es también despreciable. La contribución mayoritaria del TID proviene, por tanto, de los protones atrapados. En el caso del TNID, los protones atrapados son las únicas partículas tenidas en cuenta en el cálculo, pues tanto los electrones, como la radiación secundaria, son partículas cuyos DD son mucho menores que los que generan los  $p^+$ , y en estas condiciones son despreciables.

La dosis acumulada por año no es constante, y depende de diversos factores, algunos aleatorios. En el caso que nos ocupa, debido a que el satélite no ha estado expuesto a ningún evento solar (el principal factor aleatorio), el ritmo al que se acumula la dosis viene marcado, principalmente, por los protones atrapados. Por este motivo, son los pases por la AAS los que marca el ritmo. Como el satélite pierde altura año a año, y a menor altura la AAS tiene menos concentración de protones, cada año la dosis acumulada es menor. La Fig. 7-17 representa el TID y el TNID obtenido por simulación, en la órbita de NANOSAT, para diferentes apantallamientos esféricos de aluminio. El efecto de la pérdida de altura produce que las curvas mostradas no sean líneas rectas, es decir, la pendiente decrece ligeramente con el tiempo.

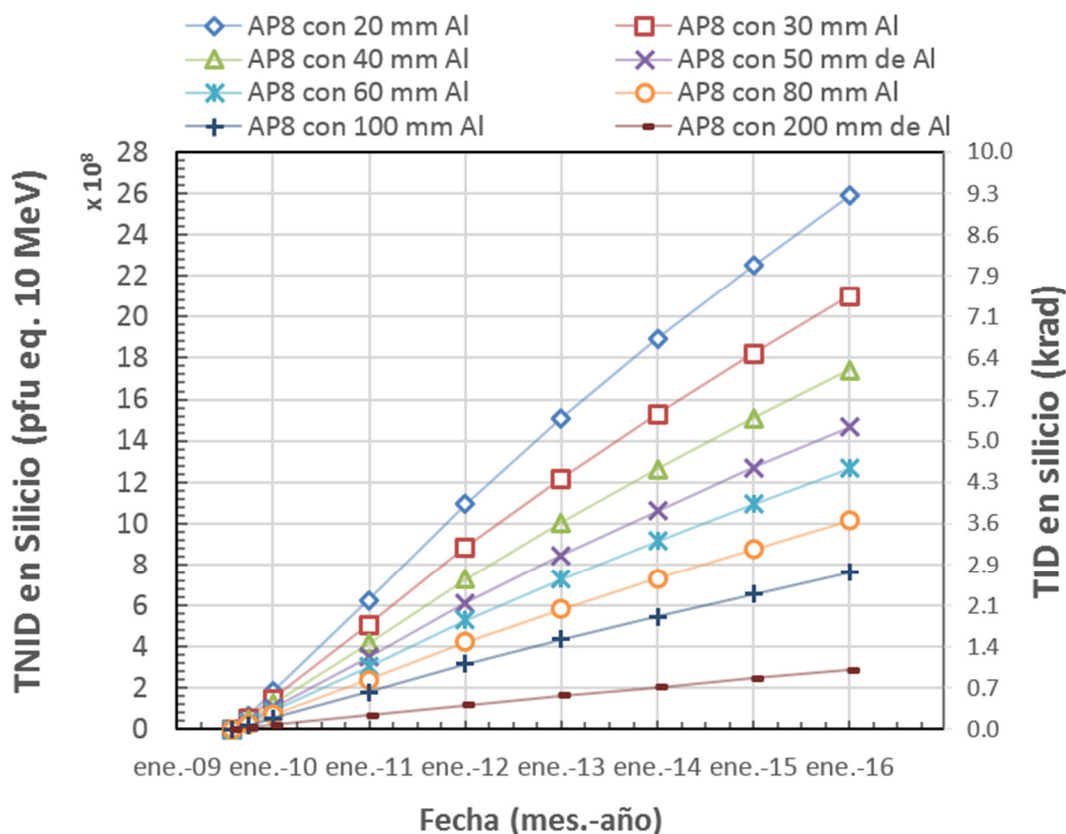


Fig. 7-17. TID y TNID acumulada en la órbita de NANOSAT-1B en función del tiempo. Se representa el valor calculado para diferentes espesores de un apantallamiento esférico de aluminio

### 1.1.1.3 Validación de las simulaciones

La Fig. 7-18 muestra los datos de los RadFET [Fer10] tras los primeros 12 meses de explotación. La dosis acumulada en silicio es de ~ 99 rad en el RadFET de 1  $\mu$ m, y de ~ 92 rad en el RadFET de 400 nm.

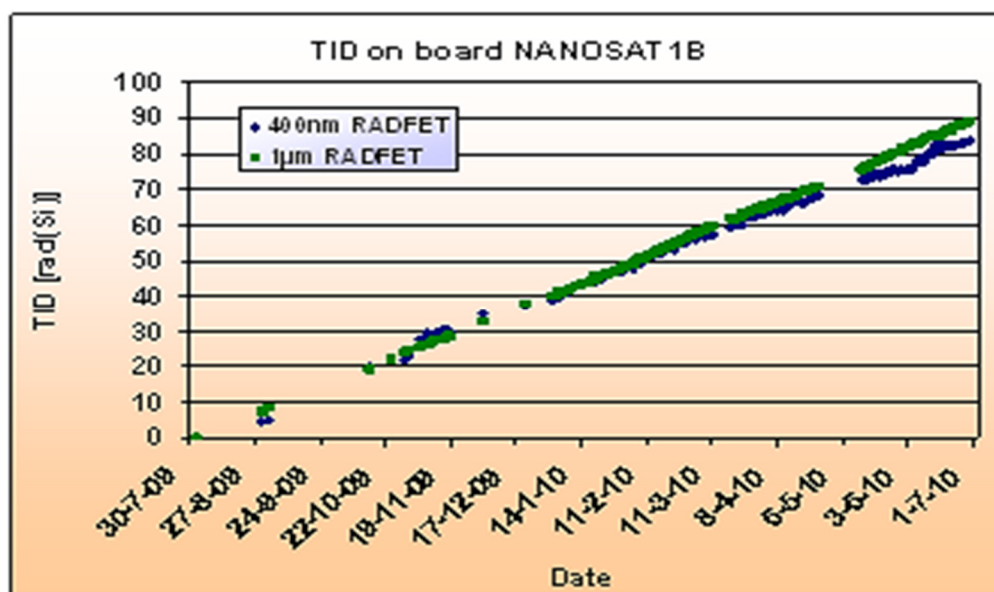


Fig. 7-18. Dosis total acumulada por los RadFET de NANOSAT-1B [Fer10]

En la Tabla 7-2 se incluye la TID estimada por simulación, los errores estadísticos que la propia simulación proporciona, y los datos reales de los RadFET.

Tabla 7-2. TID acumulada en el primer año. Datos de las simulaciones, y medidas experimentales de los RadFET de NANOSAT-1B

	RadFET 1 [400nm]			RadFET 2 [1um]		
	TID	Incertidumbre		TID	Incertidumbre	
	[rad(Si)]	[rad(Si)]	[%]	[rad(Si)]	[rad(Si)]	[%]
AP/AE-8 - Min [Simulación]	118,1	17,0	14,5%	120,5	17,3	14,4%
AP/AE9 [Simulación]	137,4	21,8	15,9%	118,9	18,6	15,6%
NANOSAT-1B [Dato experimental]	92	-	-	99	-	-

Como se esperaba, los datos obtenidos por las simulaciones son mayores que los medidos por los RadFET. Las diferencias entre ellos (la sobreestimación de la simulación) oscilan entre el 20% y el 50%, dependiendo del modelo usado y el RadFET simulado (Tabla 7-2).

En la Fig. 7-19 se han representado, los datos del TID, los simulados y los medidos por los RadFET durante la explotación. En esta grafica se aprecia como la simulación realizada con la estructura 3D, coincide con el caso de la esfera de 30 mm de aluminio (Tabla 7-3). También se ve que los datos de los RadFET coinciden con una esfera de 45 mm y de 50 mm respectivamente (Tabla 7-4). Ambos RadFET están situados muy cerca el uno del otro, y no es de esperar que entre ellos la diferencia esté provocada por un apantallamiento distinto. Esta diferencia puede venir de factores externos que estén introduciendo un error en la determinación de la dosis al usar los RadFET, tales como, efectos térmicos, o de *pérdida de carga*<sup>20</sup> en el RadFET. Tal como fuere, esta diferencia es inferior al 10% y está dentro del error de las simulaciones, y del error en la calibración de los RadFET.

<sup>20</sup> En los RadFET se produce un efecto denominado *perdida de carga* que es diferente entre RadFET de espesores de puerta distintos. En la práctica este efecto introduce una incertidumbre en la medida (similar al *annealing*) que si no se compensa haría que la medida realizada por RadFET de espesores diferentes den medidas diferentes.

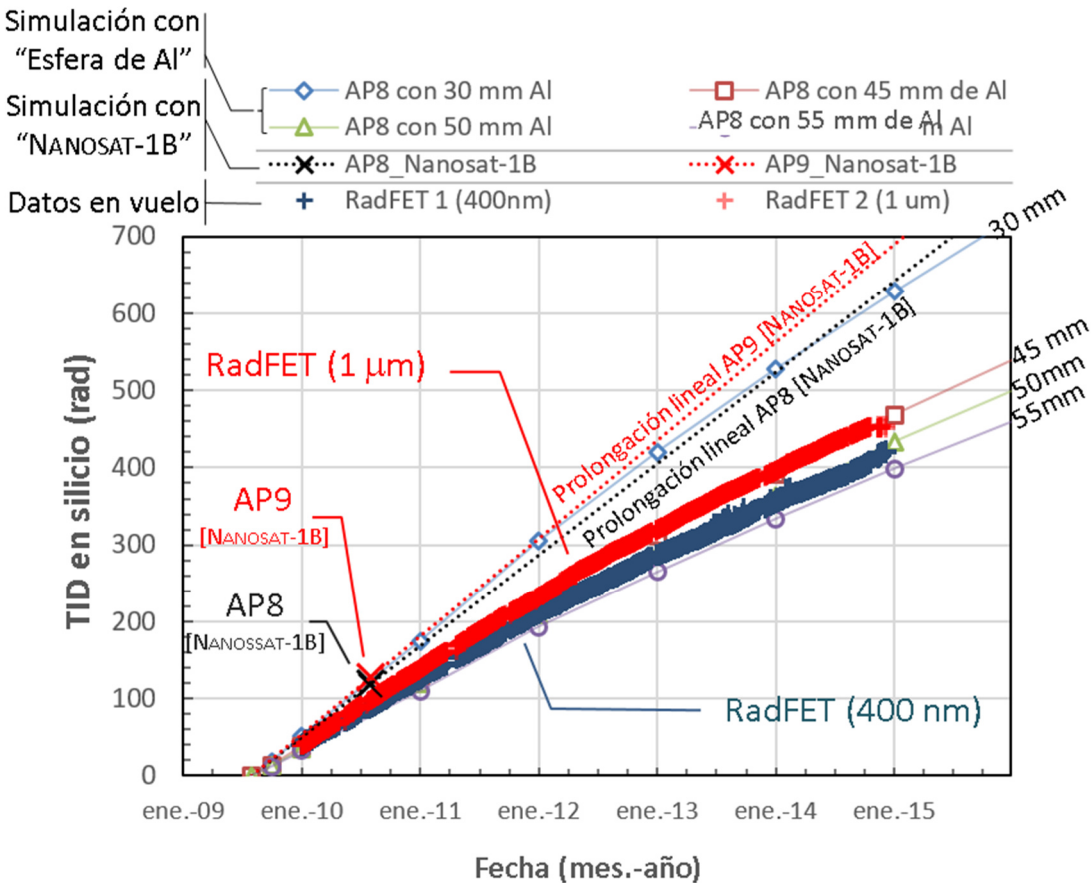


Fig. 7-19. TID acumulada en la posición de los RadFET de NANOSAT-1B. Los datos mostrados corresponden a las medidas experimentales obtenidas por los RadFET, y a los resultados de las simulaciones.

Tabla 7-3. Comparación del espesor de aluminio equivalente de la simulación realizada con la estructura 3D de NANOSAT-1B, y los datos experimentales de los RadFET

	Simulación [estructura 3D de NANOSAT-1B]	Medidas experimentales de los RadFET
Espesor de aluminio equivalente	~ 30 mm	45 - 50 mm

También se han comparado los ritmos de variación del TID. En la Fig. 7-20 se muestra la tasa de dosis obtenida con las simulaciones y con los RadFET. Se aprecia como el ritmo de dosis (*dose rate*) decae paulatinamente en todos ellos. Sin embargo, el decaimiento es ligeramente más rápido en los RadFET que en la simulación, esto se ha calculado ajustando los datos a líneas rectas, y comparando las pendientes obtenidas. Las pendientes de los datos experimentales, tiene un valor inferior al de las pendientes de los datos de la simulación.



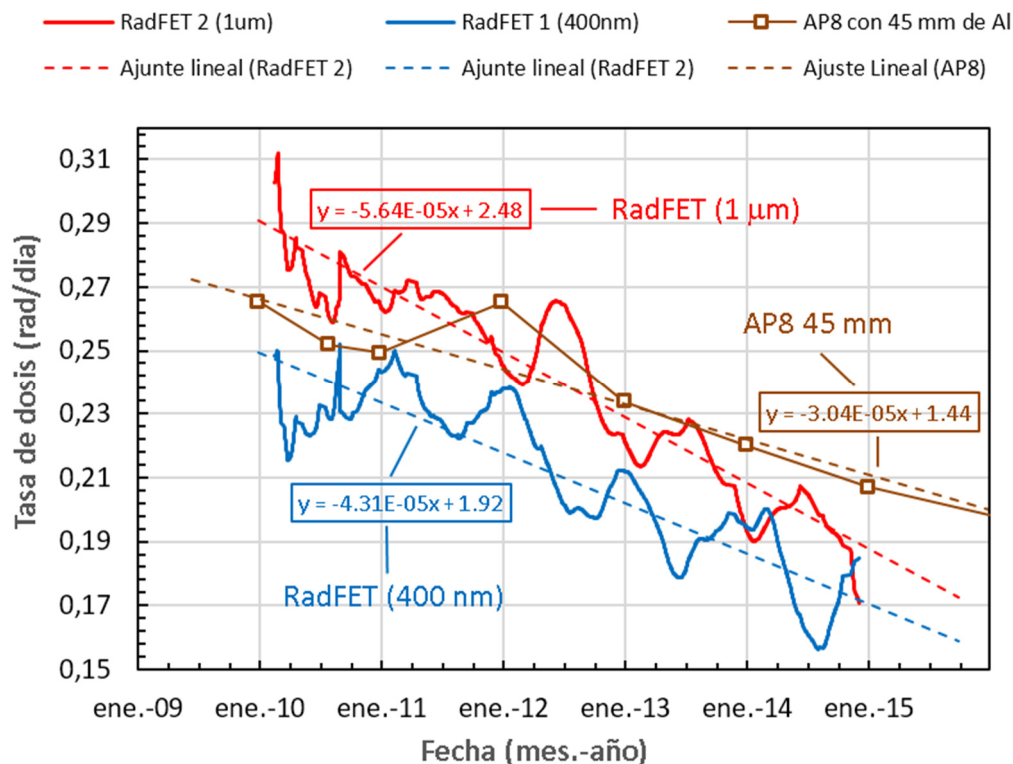


Fig. 7-20. Tasa de dosis media obtenida por los RadFET en órbita y con la simulación de una esfera de 45 mm de espesor de aluminio

En la Tabla 7-4 se muestran los datos de las sobreestimaciones que se han encontrado comparando las simulaciones, los datos de los RadFET y el espesor de aluminio de una esfera hueca que se comporta igual que los datos de los RadFET.

Tabla 7-4. Sobreestimación de los datos de la simulación por comparación con las medidas de los RadFET de NANOSAT-1B.

		RadFET 1 [400nm]	RadFET 2 [1µm]
<b>Estructura 3D de NANOSAT-1B</b>	Sobreestimación de la TID [AP/AE-8]	28 %	22 %
	Sobreestimación de la TID [AP/AE-9]	49 %	20 %
<b>Esferas huecas de aluminio</b>	Espesor de aluminio equivalente	50 mm	45 mm
	Diferencia Tasa de Dosis	< 10 %	< 10 %
	Diferencia en la evolución de la Tasa de Dosis	~ 30 %	~ 45 %

De los datos de la Tabla 7-3, se observa que el espesor de la esfera de aluminio que se aproxima a la simulación de la estructura 3D de NANOSAT es, en media, de ~30 mm. Sin embargo, la medida obtenida de forma experimental en vuelo por los RadFET equivale a un espesor de entre ~50 mm y ~45 mm (Tabla 7-4). Esto equivale a una diferencia de entre ~15 y ~20 mm. Con estos datos se establec un límite superior para



los resultados de LDT y su comparación con las simulaciones realizadas, pues debido a que la sobreestimación que introduce la simulación debería de ser menor en LDT que en los RadFET, se estima que la diferencia en LDT no debería superar los 15 mm, y este dato es el que se fija como condición para validar los resultados de LDT.

#### 1.1.1.4 Resultados aplicables a LDT

Usando la estructura 3D de NANOSAT, se ha simulado la TNID que se acumula en un año en cada uno de los pisos de LDT. Se ha realizado la simulación usando los modelos AP8 y el AP9 de la NASA. La Fig. 7-21 muestra estos resultados. Más adelante serán contrastados con los datos experimentales.

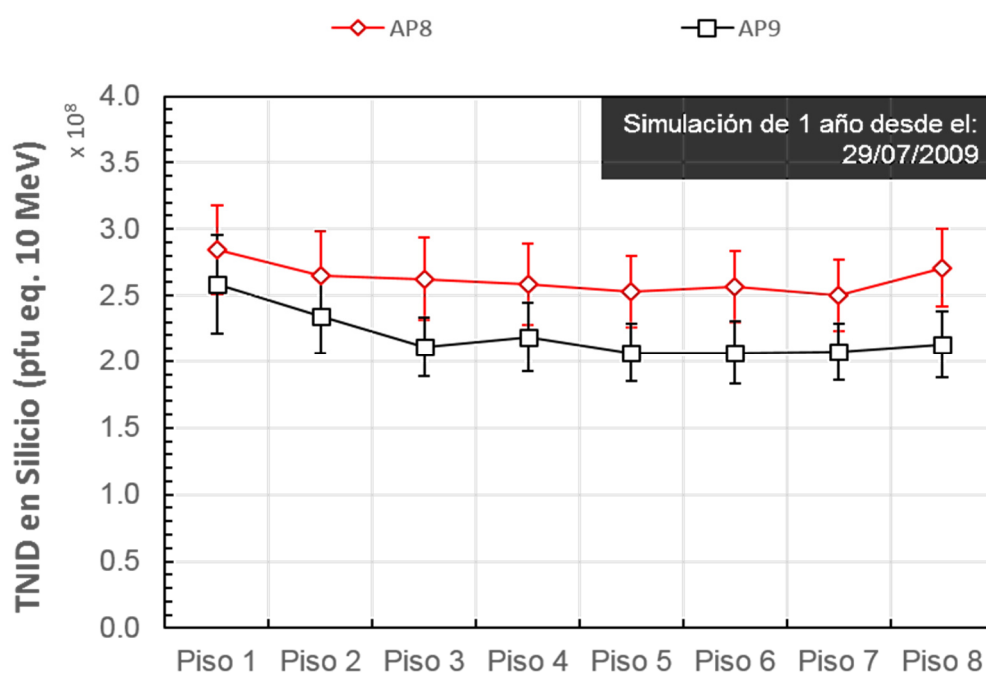


Fig. 7-21. TNID obtenida por simulación con el modelo 3D de la estructura del satélite en cada uno de los pisos de LDT

Siguiendo criterios parecidos a los utilizados en la simulación de la TID en los RadFET en la Fig. 7-22 se muestra el TNID a lo largo del tiempo. El cálculo se ha realizado para la posición del piso 7 usando la estructura 3D de NANOSAT, y suponiendo diferentes apantallamientos esféricos homogéneos de aluminio. El TNID del piso 7 coincide con el caso de un apantallamiento esférico entre 50 y 60 mm de aluminio (dependiendo del modelo de protones utilizado en la simulación). Este dato es entre 20 y 30 mm mayor que el que se había encontrado en la simulación en la posición de los RadFET, lo cual es compatible con los aproximadamente 25 mm de apantallamiento de las paredes de LDT.

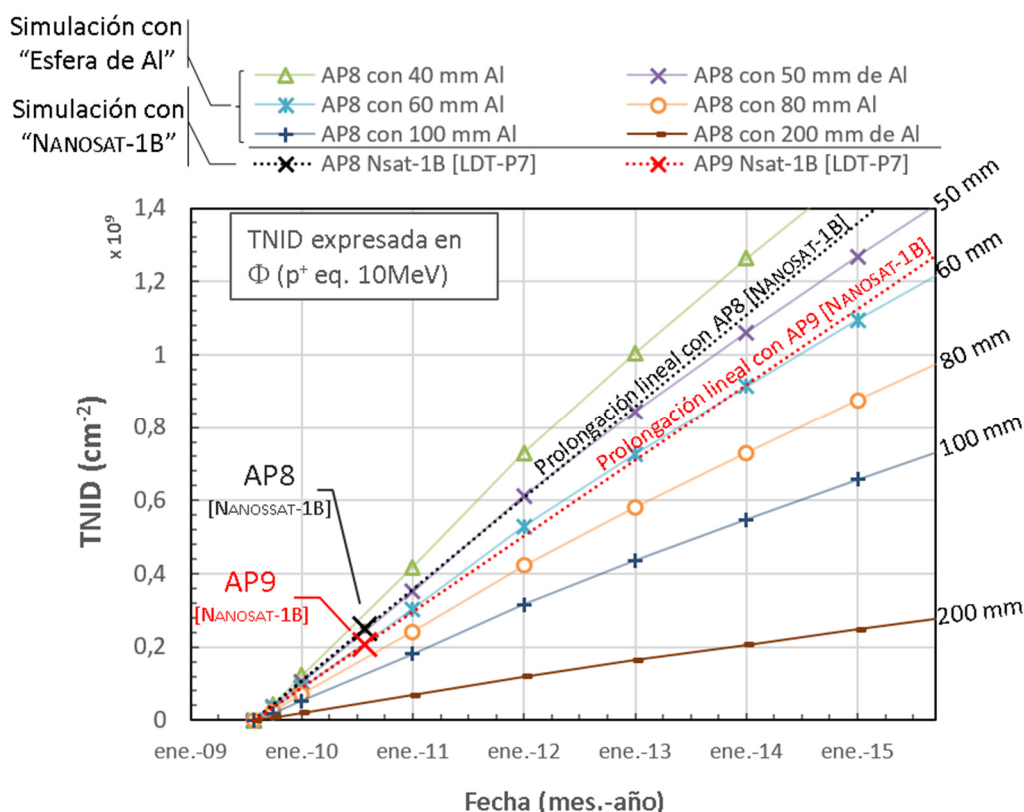


Fig. 7-22. TNID obtenida por simulación usando la estructura 3D de NANOSAT-1B en la posición del piso 7 de LDT (con los datos orbitales de justo después del lanzamiento), y usando las esferas huecas de aluminio de diferentes espesores (empleando los datos orbitales de distintos periodos de la explotación de NANOSAT-1B)

Los datos experimentales del piso 7 de LDT serán comparados con esta gráfica al final del capítulo (**Fig. 8-24**). Se verá que coinciden con los datos simulados usando una esfera de aluminio de entre 60 y 70 mm de espesor. Un espesor, en media, de  $\sim 5$  mm más que el de la simulación realizada con la estructura 3D de NANOSAT-1B. Se cumple, por tanto, la condición de validación que se había fijado de que la diferencia entre ambas tenía que ser  $< 15$  mm.

### 7.3 Activaciones de LDT

Esta sección se divide en dos apartados, en el primero se hablará de las estrategias seguidas para determinar los parámetros de activación, y en el segundo se describe el compromiso al que se llegó para tratar de unificar los parámetros de cada una de las condiciones descritas.

#### 7.3.1 Estrategias de activación

Con LDT se persigue determinar cuál es la TNID acumulada, monitorizar la AAS obteniendo mapas del flujo de esta zona a diferentes alturas, y detectar fluctuaciones del

flujo de protones producidas por eventos solares. Cada uno de estos objetivos requiere una forma concreta de medir y activar LDT atendiendo a la frecuencia y la zona de activación. Se va a detallar cuales son los condicionantes que afectan a cada una de ellas.

#### **A. Determinación de la TNID acumulada**

La fluencia acumulada se determina a través de la medida de la variación de dos parámetros que han sido calibrados: la corriente de oscuridad de los fotodiodos y la potencia de emisión de los LED. Para medir una variación, lo primero que se necesita es un valor inicial, el valor de referencia. Una vez obtenida esa referencia, solo será necesario activar LDT cada vez que se quiera obtener una medida. Cada medida dará información de la degradación sufrida desde la medida de referencia. LDT, trabajando en este modo, podrían estar apagadas un tiempo indefinido, y al encenderlas se podría evaluar esta degradación, y con ello se inferiría la fluencia de protones recibida. De este modo tan solo sería preciso activar LDT, cuando se quisiera conocer la fluencia acumulada.

La temperatura juega un papel crucial en la señal de los sensores, por ello, es necesario medir las señales siempre a la misma temperatura, o bien, una vez conocida la señal y la temperatura a la que fue tomada, aplicar una corrección térmica adecuada. La primera solución proporciona datos menos precisos, así que se optó por trabajar usando una corrección térmica.

Para mejorar el resultado de la aplicación de las correcciones térmicas, se pensó que sería útil medir con LDT a distintas temperaturas. De esa forma, se podría estimar la dependencia térmica en vuelo de las señales de LDT continuamente. Es por esta razón que se determinó que una medida de LDT debía de contemplar la adquisición de datos durante, al menos, una órbita entera. Este modo de operación permite adquirir los datos a todas las temperaturas de una excursión térmica orbital (Fig. 7-7), tanto en una rampa ascendente, como en otra descendente. El tratamiento de los datos para la corrección térmica a partir de las medidas así adquiridas, será explicado más adelante (§7.4.2)

#### **B. Monitorización de la AAS**

Uno de los objetivos de LDT es el de monitorizar el flujo en tiempo real. Para ello, lo más adecuado es medir durante las transiciones por la AAS, que es la única zona en donde hay unos niveles de radiación apreciables.

Hubiera sido deseable activar LDT cada pocos segundos de forma continua e ininterrumpida y monitorizar todas las órbitas del satélite, especialmente durante las transiciones por la AAS y los polos. Pero el hecho de que las medidas de una activación de LDT tardan algo más de 40 segundos puso la primera limitación a la frecuencia de activación (§5.4), el consumo de potencia y la memoria del satélite también fueron tenidos en cuenta. Otro aspecto está relacionado con el *annealing* de los LED, los cuales se ven influenciados por el tiempo de activación: si se activan “mucho”, sería necesario aplicarles una corrección de *annealing*.

Las restricciones más severas vinieron del ordenador de NANOSAT, ya que el tiempo de ejecución debía repartirse entre todas las tareas del satélite. No podía haber dos experimentos funcionando a la vez, y tampoco se podía activar un experimento si el satélite estaba realizando alguna otra de las funciones básicas de plataforma, ya sea la corrección de su orientación (ACS – Attitude Control System), o comunicar con Tierra. Es decir, LDT tenía que permanecer inactivas durante los pases del satélite por encima del centro de control mientras se realizaban las comunicaciones con Tierra para la descarga de datos y la subida de programaciones nuevas, durante las maniobras de orientación del satélite (ACS), y mientras algún otro experimento estaba activo. Para evitar que unas programaciones solapasen temporalmente con otras, se fijaron una serie de reglas temporales llamadas *ventanas de activación* de los experimentos. A LDT se le dio cierta prioridad, que mantiene en la actualidad, y se le otorgaron las ventanas más amplias de todos los experimentos, pero aun así, esto no fue (y no es) suficiente para monitorizar la AAS completa de forma continua.

Para maximizar la zona de activación de LDT sobre la AAS se establecieron dos ventanas de activación diarias para LDT:

- **Ventana de activación diurna.** Se caracteriza porque **la mayoría de los datos adquiridos sobre la AAS se hacen mientras el Sol ilumina el satélite**. Se inicia a las 13:00 (UTC) y se programan 100 medidas, una cada 2 minutos. De esta forma, se cubren algo más de dos órbitas completas coincidentes con el paso por la AAS. El cruce por la AAS se produce de Sur a Norte. La Fig. 7-23 muestra las medidas realizadas el 02/01/2011 durante la ventana de medidas diurnas, y que cumplían la condición de que el sol incidía sobre el satélite. Cada punto representa la posición en la que estaba el satélite al realizar una medida. Se señala con un círculo rojo el área aproximada de la AAS.

- Ventana de activación en eclipse.** Se caracteriza porque la **mayoría de los datos adquiridos sobre la AAS se hacen sin que el Sol incida sobre el satélite.** Se inicia a la 01:00 (UTC) y se programan 100 medidas, una cada 2 minutos. De esta forma se cubren algo más de dos órbitas completas coincidentes con el paso por la AAS. El cruce por la AAS se produce de Norte a Sur. La Fig. 7-24 muestra las medidas realizadas el 03/01/2011 durante la ventana de medidas nocturnas, y que cumplían la condición de que el satélite estaba en eclipse. Cada punto representa la posición en la que estaba el satélite al realizar una medida. Se señala con un círculo rojo el área aproximada de la AAS.

Es importante hacer una aclaración: no todos los puntos de la órbita de una adquisición de una *ventana de activación de eclipse* están en eclipse. Todas las órbitas siempre tienen una parte iluminada por el Sol y otra parte en eclipse, independientemente de si la órbita pertenecen a la ventana de activación diurna o de eclipse. En las dos figuras mencionadas (Fig. 7-23 y Fig. 7-24) solo se muestran las medidas correspondientes a la situación de no-eclipse (la primera) y en la situación de eclipse (la segunda), y no las 100 medidas, de las algo más de dos órbitas, de la ventana correspondiente.

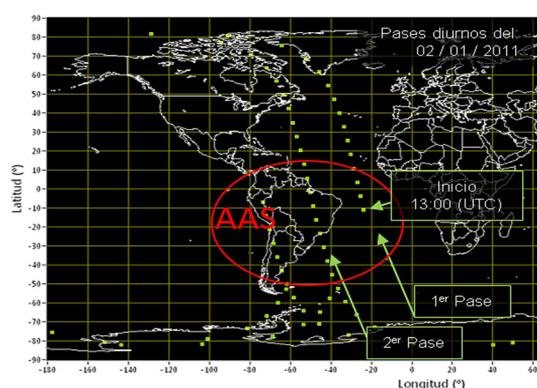


Fig. 7-23. Pase diurno por la AAS

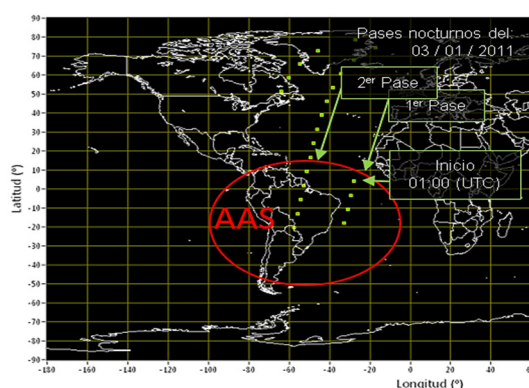


Fig. 7-24. Pase nocturno por la AAS

En estas figuras (Fig. 7-23 y Fig. 7-24) parece que solo se barren dos líneas de los pases nocturnos y dos de los diurnos, pero en realidad, recogiendo las medidas diariamente, se ve que hay un desplazamiento de esas dos líneas hacia el Oeste, de tal forma que, trascurridos 5 días, la línea del primer pase se junta con la línea del segundo pase del primer día. Así se consigue barrer algo más de la mitad de la AAS. La Fig. 7-25 muestra una secuencia en la que se ven los pases por la AAS, de diferentes días consecutivos, en los que se aprecia el área total convertida.

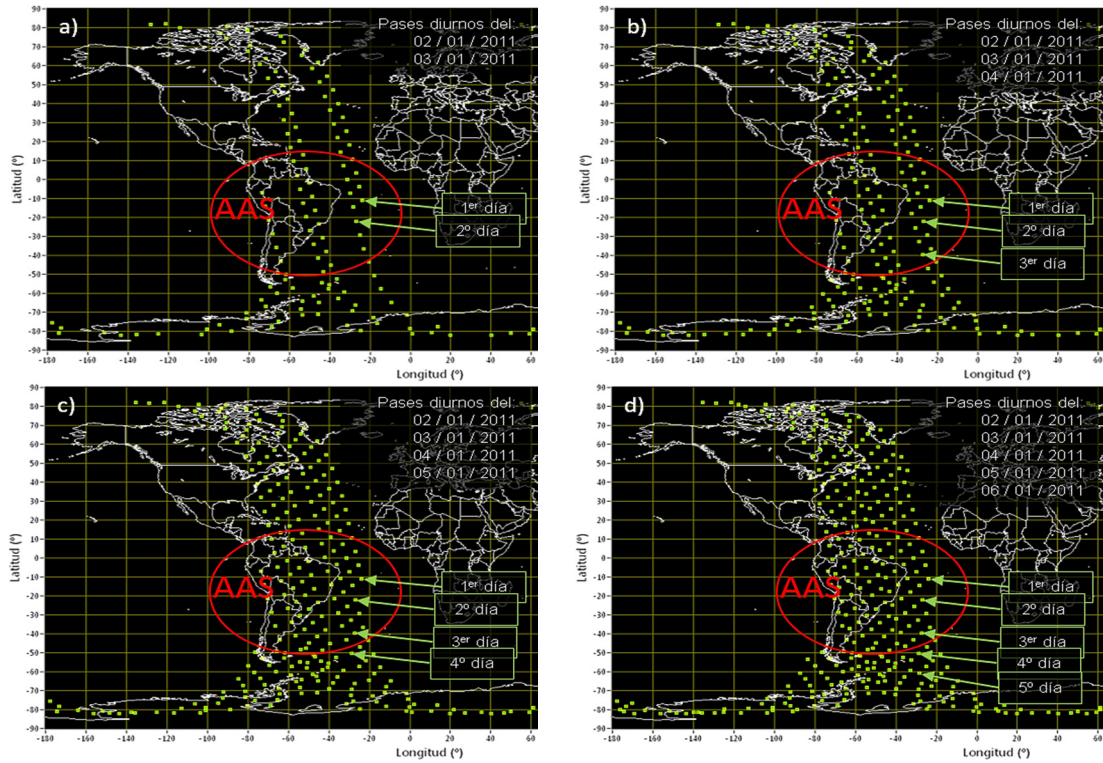


Fig. 7-25. Pase diurno por la AAS en 5 días consecutivos

En la Fig. 7-26 se representan el primer día de la secuencia y el sexto. Se observa que este día la traza de la órbita coincide, aproximadamente (la separación es  $< 2^\circ$  en el sistema de coordenadas esférico de la Tierra), con la del primero, y la secuencia de medidas se repetiría pero ligeramente desplazada. De esta forma, se consigue ir mapeando la superficie de la AAS.

En los pases nocturnos sobre la AAS, sucede algo parecido, excepto que en los meses del invierno boreal, la zona meridional de la AAS no se sobrevuela en eclipse (el satélite está iluminado por el sol). En la Fig. 7-27 se muestran las adquisiciones en eclipse, en donde se puede apreciar cómo se va barriendo la superficie día a día y la diferencia entre los meses de invierno y de verano. Se aprecia bien, cómo en el invierno, la zona al sur de  $-30^\circ$  de latitud no tiene adquisiciones en eclipse. En realidad sí se realizaron medidas, pero el Sol incidía

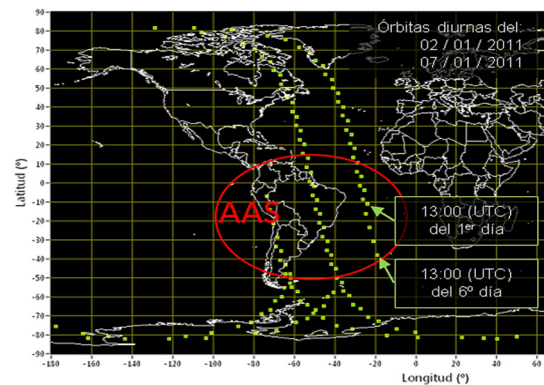


Fig. 7-26. Pases diurnos por la AAS de dos órbitas separadas 6 días



directamente sobre el satélite y no pertenecen a medidas en eclipse<sup>21</sup>. En el verano, sin embargo, la zona de eclipse se desplaza más al sur, y se cubre toda la AAS con medidas tomadas en eclipse.

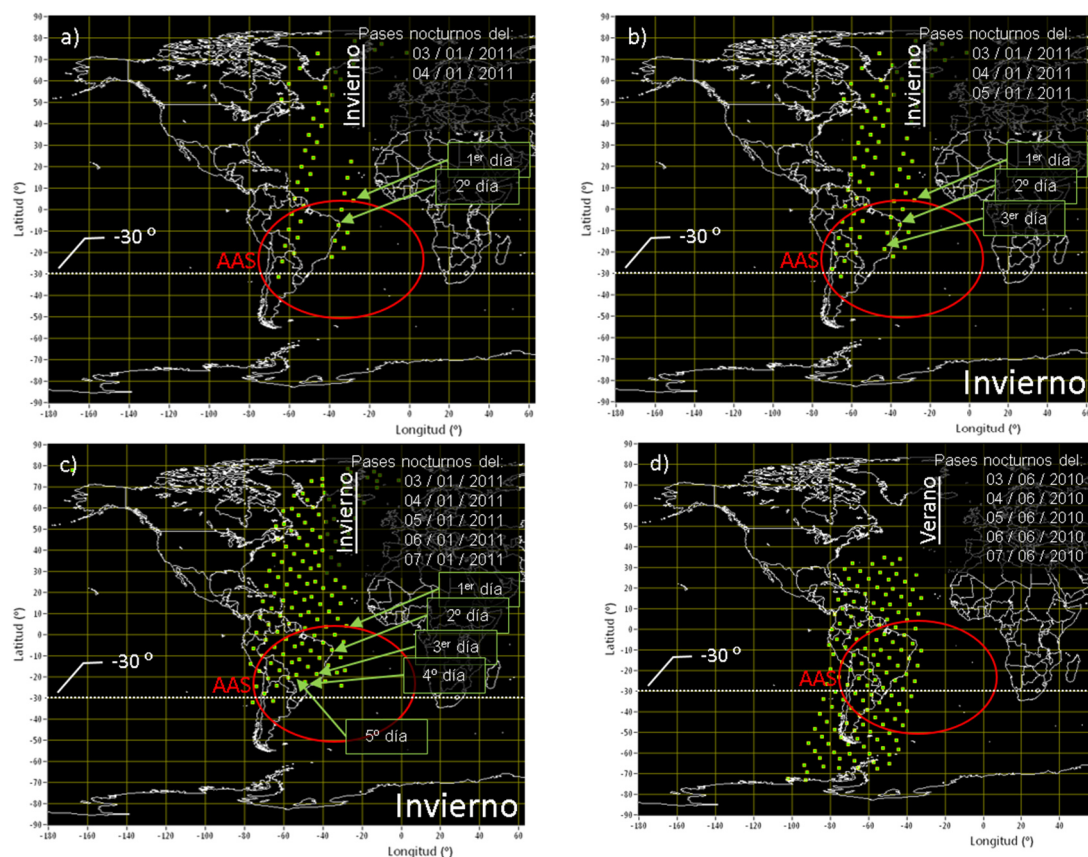


Fig. 7-27. Pases en eclipse por la AAS días consecutivos en invierno: a), b) y c); y en verano: d)

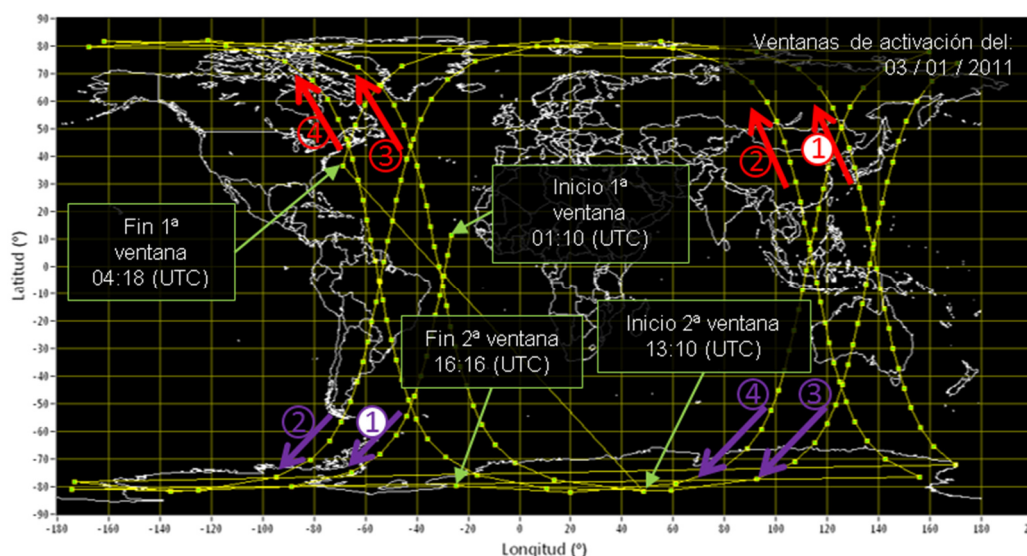
El decaimiento horario de una órbita heliosíncrona (§7.2.1) afecta a las activaciones de LDT desplazándolas hacia el Este. Por este motivo, sería conveniente retrasar el inicio de las ventanas de activación transcurrido unos años. Hasta la fecha no se ha modificado este parámetro, pues aunque el desplazamiento de las franjas es apreciable, no se ha dejado fuera, todavía, el centro de la AAS. Sin embargo, se está cerca de tener que realizar ese cambio, para lo cual habrá que reajustar las ventanas de activación de todos los experimentos. En §7.3.2 (Fig. 7-34) se muestra una secuencia de figuras que muestra el desplazamiento al Este de las ventanas de activación, y en §8.2.2.2 (Fig. 8-3 y Fig. 8-4) se calcula un factor que corrige ciertas medidas que se han visto alteradas por este efecto.

<sup>21</sup> No pertenecen a medidas adquiridas en situación de eclipse, pero si forman parte de la ventana de activación en eclipse.

### C. Detección de tormentas solares

Una tormenta solar puede suceder en cualquier momento, y en una órbita LEO, como la de NANOSAT, sus efectos solo son apreciables en los polos y, algunas veces, en la AAS. Lo idóneo sería poder adquirir datos en todos los por estas zonas, pero dado que estas tormentas duran entre varias horas y varios días, una frecuencia de activación de 12 h debería ser suficiente para poder detectarlas. No obstante, es necesario que la tormenta solar llegue a afectar a este tipo de órbitas, que como veremos, no siempre sucede.

Las activaciones para la monitorización de la AAS antes mencionadas, realizan 4 pases por la AAS diariamente: 2 en situación de eclipse y otros 2 en situación diurna, y además hacen 4 pases por el polo Norte y otros 4 por el polo Sur. En la Fig. 7-28 se muestran las 4 órbitas de una de estas activaciones. Se señalan los 4 pases del polo Norte (flechas rojas) y los 4 del polo Sur (flechas moradas), así como la primera y última medida de cada ventana de activación. En definitiva, nunca pasan más de 9 horas sin que LDT entre en una ventana de activación, con pases por los polos y por la AAS.



*Nota: Se marcan los 4 pases por cada uno de los polos*

Fig. 7-28. Ventanas de activación nominal

### 7.3.2 Activaciones ejecutadas

Los aspectos claves de la estrategia de activación que se han descrito son: medir sobre la AAS y los polos, no dejar más de 12 h sin activar, y al activar LDT sobre la AAS medir con una frecuencia “suficiente” para obtener un número “razonable” de puntos dentro de la AAS.



La primera activación, que se realizó el día 02/08/2009, fue una órbita entera: se midió entre las 7:28 y las 9:03 cada 5 minutos. La Fig. 7-1 mostró esta activación de LDT.

Las activaciones de LDT, en una primera fase, se hacían de forma manual, lo cual obligaba a estar programando las activaciones de LDT todas las semanas. Se estuvo operando LDT de manera manual durante los primeros 5 meses desde el lanzamiento (29/07/2009). Durante estos meses, el satélite estaba en el periodo de validación, y las activaciones de LDT estaban limitadas, por esta razón solo se pudo activar LDT durante 17 días. Se hicieron diferentes ensayos de activación, cuyas primeras medidas se realizaban cada 5 minutos. A pesar de ello, se permitió a LDT estar activa durante 14 horas seguidas, el día 04/08/2009, para tomar una referencia completa del estado inicial de todas las señales. En la Fig. 7-3 se mostró la posición geográfica de todas las medidas realizadas durante esa activación.

Posteriormente, se actualizó el SW del satélite para que LDT pudiera ser programada en un modo denominado *programación periódica*. En él se fijan los parámetros de activación de LDT desde Tierra, y el ordenador de NANOSAT los ejecuta de manera indefinida, o hasta que se comande su parada desde Tierra.

El modo nominal de trabajo es el descrito en el §7.3.1 (apartado B. Monitorización de la AAS). Este modo establece que las medidas se hacen cada dos minutos en dos ventanas de 3,3 horas (2 órbitas) al día. Una se inicia a las 01:00 (UTC) y dura hasta las 4:18 (UTC) y la otra de 13:00 (UTC) a 16:18 (UTC).

En ciertos momentos, no se ha seguido el modo nominal de activación, en unos casos por activar durante más órbitas para cubrir zonas que normalmente no se cubren, y en otros por restricciones adicionales impuestas por la propia plataforma. En definitiva, se pueden distinguir 4 fases en las activaciones de LDT:

- Fase en modo manual:
  - del 02/08/2009 al 21/09/2009.
- Fase en modo automático nominal:
  - En pruebas del 21/11/2009 al 19/01/2010.
  - En ejecución: del 20/01/2010 al 17/03/2011.
- Fase en modo automático nominal extendido:

- En pruebas del 18/03/2011 al 26 /05/2011.
- En ejecución del 27/05/20011 al 05/09/2011.
- Fase nominal restringida:
  - Desde el 06/09/2011.

En la Fig. 7-29 se representan algunos datos relacionados con las activaciones de LDT en función de la fecha: el número de medidas realizadas durante las 24 horas del día, la hora de inicio de las medidas de la ventana nocturna, y la hora de inicio de las medidas de la ventana diurna. Se marcan también con una cruz roja sobre el propio eje horizontal, los días en los que LDT no han sido activadas.

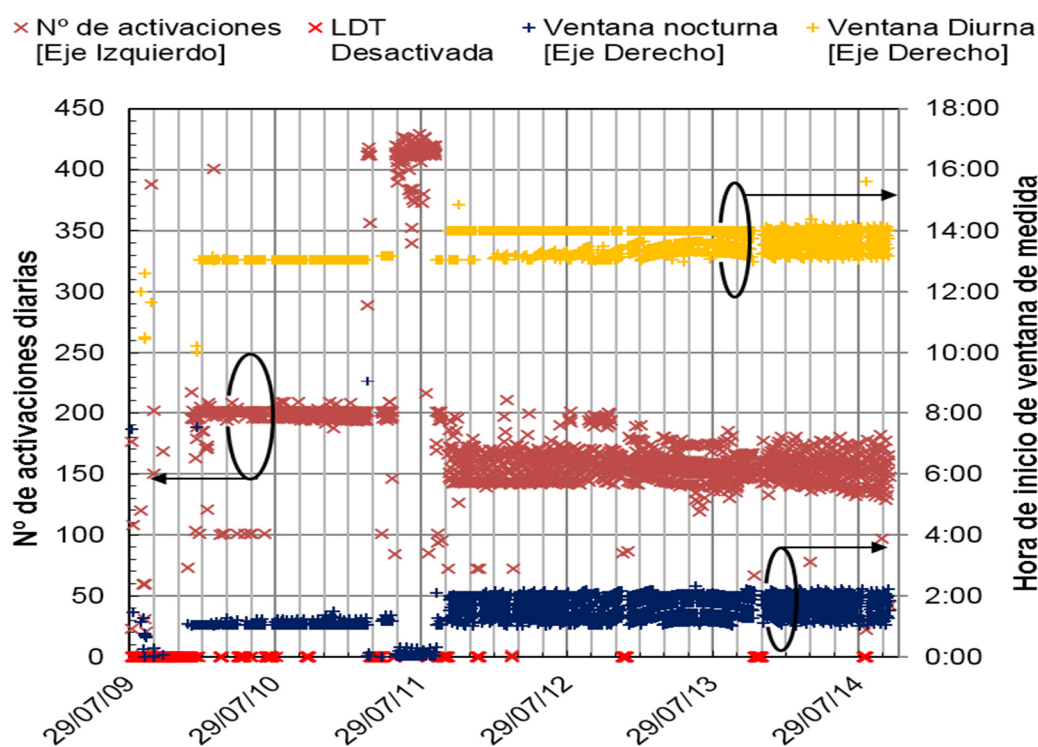


Fig. 7-29. Parámetros de las activaciones de LDT desde el lanzamiento el 29/07/2009 hasta el 15/10/2014.

En la Fig. 7-29 pueden identificarse las cuatro grandes fases en el histórico de la explotación de Las Dos Torres:

- El inicio de la explotación vino marcado por la **activación manual**, sin un patrón definido en las ventanas y numero de activaciones.
- La siguiente fase viene marcada por la regularidad tanto en el número de activaciones como, en las horas de inicio de las ventanas de las **activaciones nominales**.

- La tercera fase se corresponde con un incremento en el número de activaciones por ventana, aproximadamente el doble. Ese fue el periodo de las **activaciones extendidas**.
- En el último periodo, que es el más largo, el número de activaciones varia de unos días a otros manteniendo una media de ~ 150 activaciones por día. El instante de inicio de la ventana de activación cambia por necesidades de la plataforma, ya que era necesario activar el control de ACS en ciertos momentos. Este periodo corresponde con las **activaciones nominales restringidas**.

La Tabla 7-5 muestra algunos parámetros de estas activaciones.

Tabla 7-5. Activaciones de LDT a lo largo de toda la explotación.

Fechas Inicio / Fecha Fin	Modo de activación	Ventanas por día	Hora de activación 1ª Ventana / 2ª Ventana	Órbitas completas por día	Medidas programadas por ventana / realizadas	Periodo de medida	Días activados / Días totales del periodo
[dd:mm:aaaa]		[#]	[hh:mm:ss]	[#]	[#]	[minutos]	[#]
02/08/2009 / 21/10/2009	Manual	Variable	Variable	Variable	Variable	5	17 / 82
21/12/2009 / 13/01/2010	Automático (en pruebas)	1	01:00:00 / N.A	~4	200 / ~190	2	13 / 84
14/01/2010 / 15/01/2010	Automático (en pruebas)	1	07:30:00 / N.A	~4	195 / 195	2	2 / 2
16/01/2010 / 19/01/2010	Automático (en pruebas)	1	01:00:00 / N.A	~4	200 / ~195	2	2 / 4
20/01/2010 / 17/03/2011	Nominal	2	01:00:00 / 13:00:00	~4	200 / ~200	2	368 / 422
18/03/2011 / 26/05/2011	Automático extendido (en pruebas)	1	00:00:00 / N.A	~8	400 / Variable	2	37 / 70
27/05/2011 / 05/09/2011	Automático Extendido	1	00:00:00 / N.A	~8	400 / Variable	2	97 / 102
06/09/2011 / 15/10/2014	Nominal con restricción extras de ACS	2	~01:00:00 <sup>1</sup> / ~13:00:00 <sup>1</sup>	~4	200 / Variable En general >150 <sup>1</sup>	2	1073 / 1136

*Nota 1:* la hora exacta y el número de activaciones de inicio dependen de las actuaciones del control de ACS.

Otro detalle que debe de quedar patente son las zonas geográficas barridas. La Fig. 7-30 muestra las activaciones del periodo manual, la Fig. 7-31 muestra 3 meses del modo nominal, y la Fig. 7-32 otros 3 meses de las activaciones extendidas.

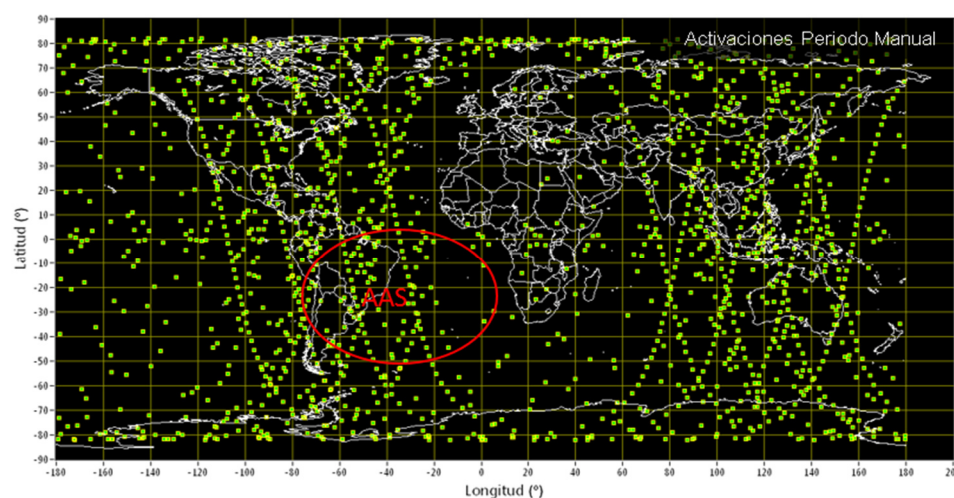


Fig. 7-30. Representación geográfica de las medidas realizadas durante el periodo manual de programación de LDT

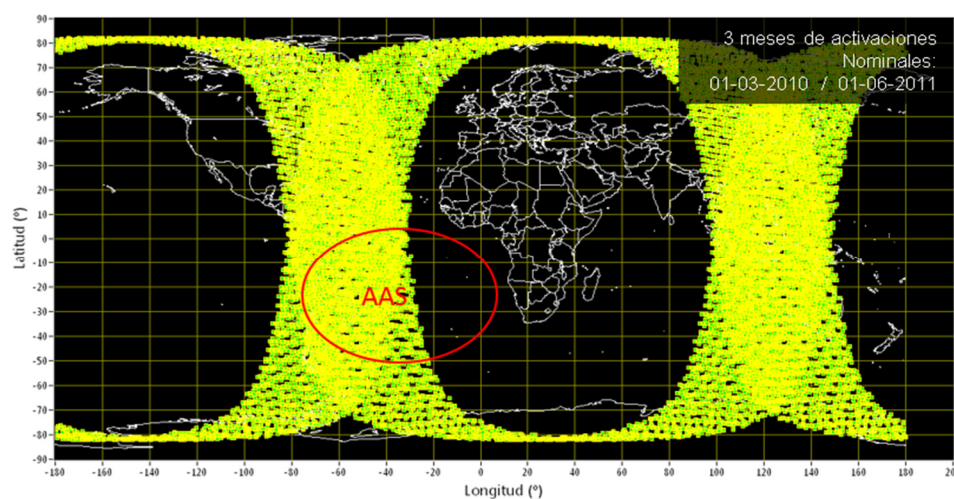


Fig. 7-31. Medidas realizadas durante el periodo de activación automático nominal

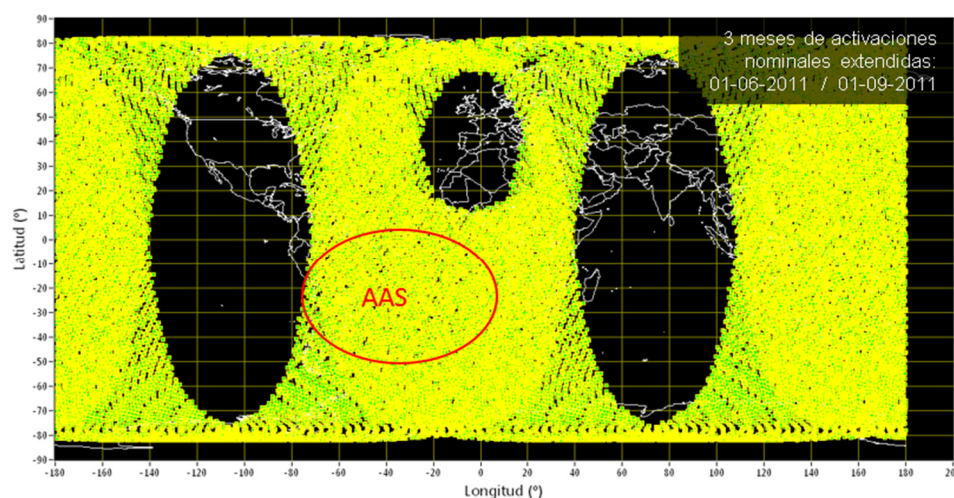


Fig. 7-32 Medidas realizadas durante el periodo activación automático nominal extendido

En la figura en que se muestran las activaciones extendidas (Fig. 7-32) se aprecia como un cirulo, de unos 50° de diámetro sobre España, queda libre de medidas. Esto es así porque esa es la cobertura geográfica de comunicación con NANOSAT desde las instalaciones del segmento terreno en el INTA (en Torrejón de Ardoz, Madrid). Esto es una consecuencia directa de la imposibilidad del ordenador de a bordo del satélite para realizar ciertas tareas simultáneamente: durante las comunicaciones, LDT no mide. Las zonas sin medidas en las longitudes de EEUU e India corresponden a zonas en las que realmente LDT no se activó, no por temas relacionados con solapamiento de tareas del satélite, sino, simplemente, porque esas zonas no corresponden con ninguna de las ventas de activación.

La Fig. 7-33, compuesta por una secuencia de 2 mapas, muestra las activaciones durante tres meses de una activación nominal (izquierda) y otra restringida (derecha). En la restringida, se marca una zona donde se aprecia un menor número de activaciones que en la nominal. Este número inferior de activaciones es debido, como se ha comentado, a las actuaciones del ACS.

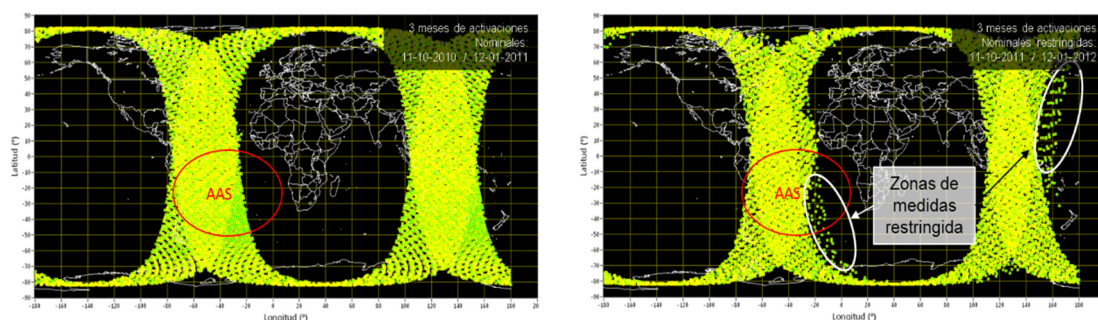


Fig. 7-33. Representación geográfica de las medidas realizadas durante 3 meses del periodo automático nominal (izquierda), y del inicio del nominal restringido (derecha)

La Fig. 7-34 es una secuencia de 2 imágenes correspondientes a las activaciones de 3 meses realizadas a finales de 2012, y a los meses de julio, agosto y septiembre de 2014. En ella se aprecia el corrimiento hacia el Este que ha sufrido el área barrida, y que, actualmente, está a punto de abandonar la zona de interés. Este corrimiento es  $\sim 7^\circ$  por año. Se aprecia también el descenso en la densidad de medidas en las zonas de activación del ACS. De hecho, en la imagen de la derecha, prácticamente no hay ninguna medida en la zona más al Este de la AAS, y esto es debido, precisamente, a la restricción de activaciones que impone el sistema ACS.



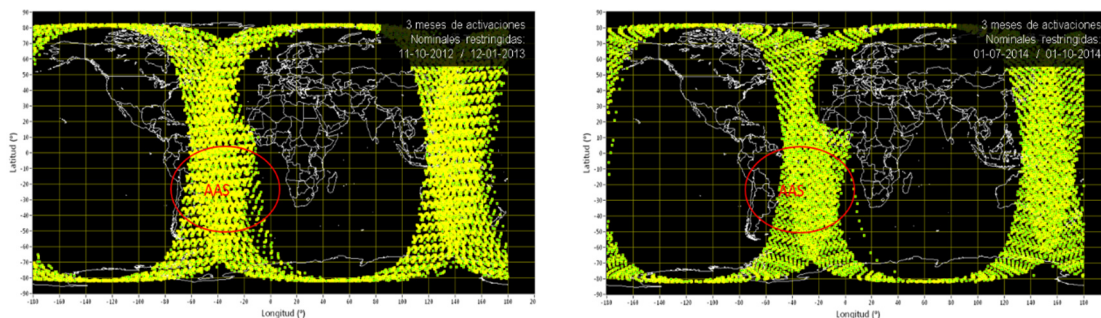


Fig. 7-34. Representación geográfica de las medidas realizadas durante 3 meses a finales de 2012 (izquierda), y de julio, agosto y septiembre de 2014 (derecha)

En esta sección se han mostrado los requisitos que debían cumplir las activaciones de LDT para poder monitorizar la AAS y para la detección de tormentas solares. Estas activaciones también posibilitan la medida de la TNID acumulada, cuyos requisitos son mucho menos restrictivos. Igualmente se ha explicado el compromiso al que se ha llegado para activar a LDT durante la explotación y las restricciones existentes. Revisando toda esta información se puede decir que las activaciones de LDT han cumplido la mayor parte de los objetivos. Quizá, los puntos más discutibles son la falta de regularidad durante las activaciones restringidas, y el efecto del corrimiento al Este de las áreas barridas, debido, principalmente, a la falta de flexibilidad para fijar las ventanas de activación. A pesar de todo ello, a LDT se le ha dado prioridad en la selección de los tiempos y ventanas de activación, y gracias a eso se han podido cubrir las necesidades básicas de explotación. Un punto que ha quedado sin realizar, y del que no se ha hablado, es uno relacionado con la detección de la dirección de las partículas. Para haber podido identificar la dirección y sentido de incidencia de las partículas, se habría tenido que combinar las activaciones de LDT con unas orientaciones específicas del satélite mediante una actuación previa del ACS. En cierto momento, se consideró viable, pero al final ese tipo de activaciones no fueron permitidas.

## 7.4 Obtención y preparación de los datos

Los datos generados en LDT son enviados a tierra y recibidos en la estación de recepción del satélite. Ahí se ordenan, almacenan y son puestos a disposición de los investigadores. Las ventanas de transmisión están limitadas temporalmente, y coinciden con los pases del satélite por encima de la estación de recepción, cuando la antena tiene visión directa del satélite. La Fig. 7-35 muestra un esquema del flujo que siguen los datos hasta quedar listos para su análisis.

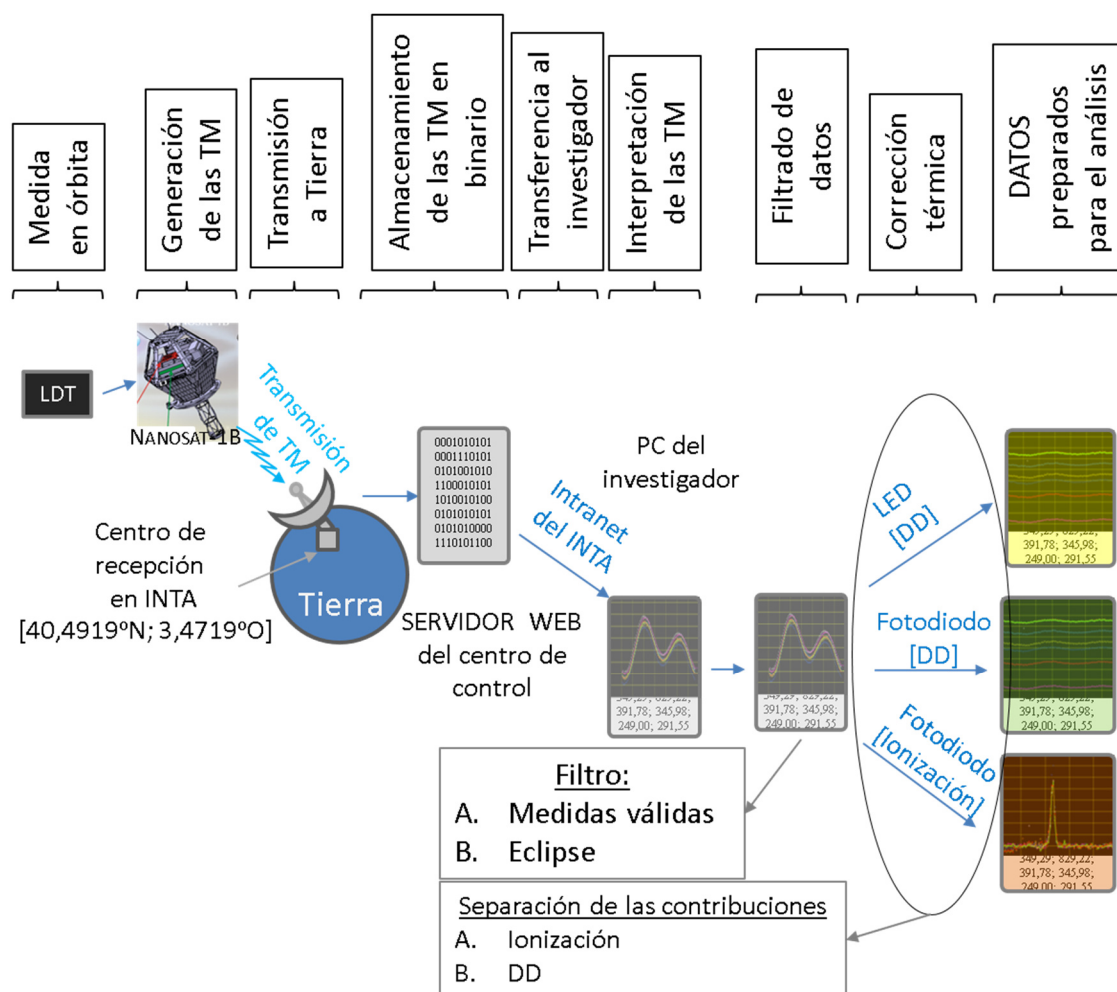


Fig. 7-35. Flujo seguido por de los datos de LDT desde NANOSAT-1B hasta el experimentador

La estación de recepción del NANOSAT está situada en las instalaciones que el INTA tiene en Torrejón de Ardoz, al Este de Madrid, en las coordenadas geográficas: 40,4919 N; 3,4719 O.

Los datos que ahí se recogen son ordenados por fecha y por tipo de experimento en el servidor del centro de control. Los diferentes responsables de los experimentos tienen acceso, por medio de una aplicación web, a través del intranet del Instituto. El ordenador de NANOSAT genera archivo binario por cada medida que LDT realiza. Por tanto, la información de una órbita que ha sido monitorizada con una frecuencia de 2 minutos, está contenida por 48 archivos individuales. Durante las activaciones automáticas nominales, LDT está midiendo durante algo más de 4 órbitas, generando ~ 200 archivos diarios, o lo que es lo mismo, ~ 6000 por mes. El número exacto de archivos depende del número de activaciones que finalmente se ejecuten, pues el satélite desconecta a LDT en función de las necesidades de la plataforma y de otros experimentos.

La aplicación web permite seleccionar un experimento y el periodo de tiempo del que se desean descargar las medidas. Los datos descargados, en formato “.zip”, incluye todos los archivos con las medidas, la configuración, el estado de “salud” (que no tienen ninguna información de las medidas realizadas), y los datos de otros experimentos que también se realizan con LDT, que quedan fuera del objetivo de este trabajo de tesis.

Dada la gran cantidad de archivos (TM – Tele Medidas) manejada, se hizo necesario desarrollar herramientas SW para el filtrado y tratamiento automatizado de datos. Se empleó LabView en el desarrollo de varios módulos para las diferentes etapas del tratamiento: filtrado de TM, interpretación de TM, filtrado de las medidas, corrección térmica de las señales, separación de los datos de ionización (flujo de partículas) de los de DD (fluencia acumulada) y el análisis de datos para extraer la información del entorno de radiación.

En esta sección se describe el formato de las TM y los parámetros tenidos en cuenta para el filtrado de los datos (§7.4.1). También se describe como se ha realizado la corrección térmica (§7.4.2) y como esta lleva de forma directa a separar los datos que son proporcionales a los DD de los que lo son a la ionización (§7.4.3).

#### **7.4.1 Interpretación de las TM y filtrado de datos**

Cada TM tiene diversos campos con datos encapsulados en formato binario, por lo que no pueden ser leídas directamente y deben de ser interpretadas en función del tipo de dato interno de cada campo.

Estas TM tienen toda la información de una medida completa, en la que se incluyen además de las señales de los sensores de radiación de LDT, datos sobre el instante en el que la medida fue tomada, posición geográfica que sobrevolaba el satélite en ese instante, altura a la que lo hacía, y si el satélite estaba en eclipse o no. Además, junto con los datos de LDT, se incorporaron las medidas de los dos RadFET y de otros sensores que podrían tener utilidad en el futuro para la determinación de la orientación del satélite durante las adquisiciones [Mic09]. Para que el lector se haga una idea de los campos de una TM, se muestra en la Fig. 7-36 un pantallazo del módulo SW de interpretación de las TM, en donde están ordenados todos los campos que se manejan en el análisis.



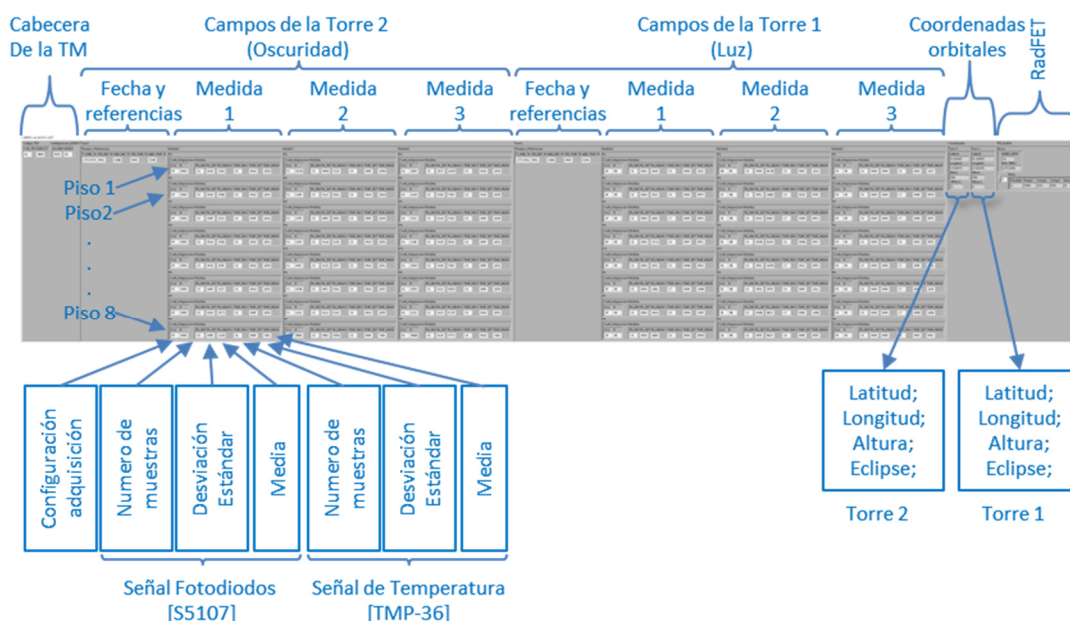


Fig. 7-36. Pantallazo de la representación de los datos de una TM de LDT. Se señala a que corresponde cada campo o conjunto de campos de la estructura.

Estos datos se pueden visionar en diferentes tipos de gráficas para facilitar algunas comprobaciones relacionadas con la integridad y validez de la TM. Esta funcionalidad fue clave durante el proceso de desarrollo de la herramienta y los primeros pasos en la adquisición de las TM. Actualmente, todo el proceso está automatizado y las TM defectuosas se detectan de manera automática. La automatización del proceso facilita la interpretación del conjunto de varios días, analizando su evolución semanal, mensual o anualmente. Ya no suele ser habitual procesar un dato aislado estudiarlo campo a campo.

Hay dos filtros fundamentales para la interpretación de las TM: el que detecta puntos defectuosos atendiendo a algunos parámetros como el ruido de la señal adquirida o la detección de valores fuera de rango, y el filtro de eclipse.

Se está haciendo tanto hincapié en la diferenciación y separación de los datos medidos en eclipse, de los datos medidos bajo iluminación del Sol, debido a que el satélite no es totalmente estanco a la luz y hace que la señal del primer piso de LDT quede prácticamente inutilizada cuando entra luz en su interior. Por eso, en ciertas ocasiones, solo se analizarán los *datos en eclipse* y es necesario poder distinguirlos de los que se llamarán *datos o medidas diurnas*.

## 7.4.2 Corrección térmica – separación de los efectos de DD y de ionización

El objetivo de la corrección térmica es corregir la dependencia de las señales de LDT con la temperatura.

Para ello, hay dos fases que serán descritas en esta sección: la determinación de la dependencia térmica de las señales en vuelo (§7.4.2.1) y la corrección térmica de las señales en base a esa dependencia (§7.4.2.2)

### 7.4.2.1 Determinación de la dependencia térmica en vuelo

Como se ha descrito en la §6.4, las señales de LDT son dependientes de la temperatura y necesitan ser corregidas. En esa sección se calculó la dependencia de las señales de LDT con la temperatura, se vio que los parámetros encontrados no son constantes a lo largo de toda la explotación, ya que cambia con la TNID acumulada. Este es el motivo por el cual se tienen que obtener diariamente los parámetros de la relación entre las señales y las temperaturas.

Para la recalibración en vuelo, se aprovechan las excursiones térmicas naturales que se producen en una órbita entre la zona de eclipse solar y la zona de iluminación directa. Es decir, con los datos de una o varias órbitas, se realiza un ajuste similar al que se hizo durante la calibración térmica en el laboratorio (§6.4), obteniendo los parámetros de corrección diarios.

A continuación se describen estos ajustes poniendo como ejemplo datos obtenidos durante la explotación.

#### A. Torre de luz – Determinación de la dependencia térmica

La Fig. 7-37 muestra la temperatura de los ocho canales de la torre de luz, medida por los TMP-36, durante la adquisición de las 2 órbitas de la madrugada del día 01/01/2010. La figura Fig. 7-38 muestra la señal de los fotodiodos de dicha torre. Se aprecian las excursiones térmicas y el efecto sobre la señal, la cual es inversamente proporcional a la temperatura<sup>22</sup>. La corriente medida sobre el piso 1 muestra un comportamiento irregular debido a la no estanqueidad óptica del satélite.

---

<sup>22</sup> La señal de la torre de luz depende de la potencia óptica de emisión del LED que disminuye al aumentar la temperatura (§6.4.1)

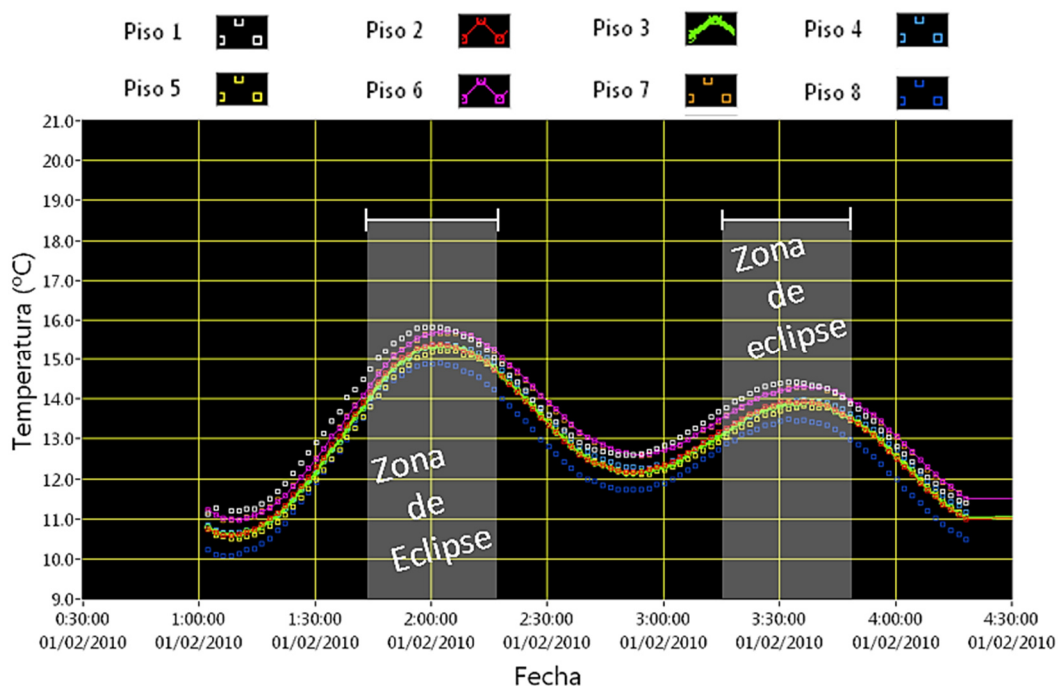


Fig. 7-37. Temperatura de los fotodiodos de la torre de luz en grados centígrados

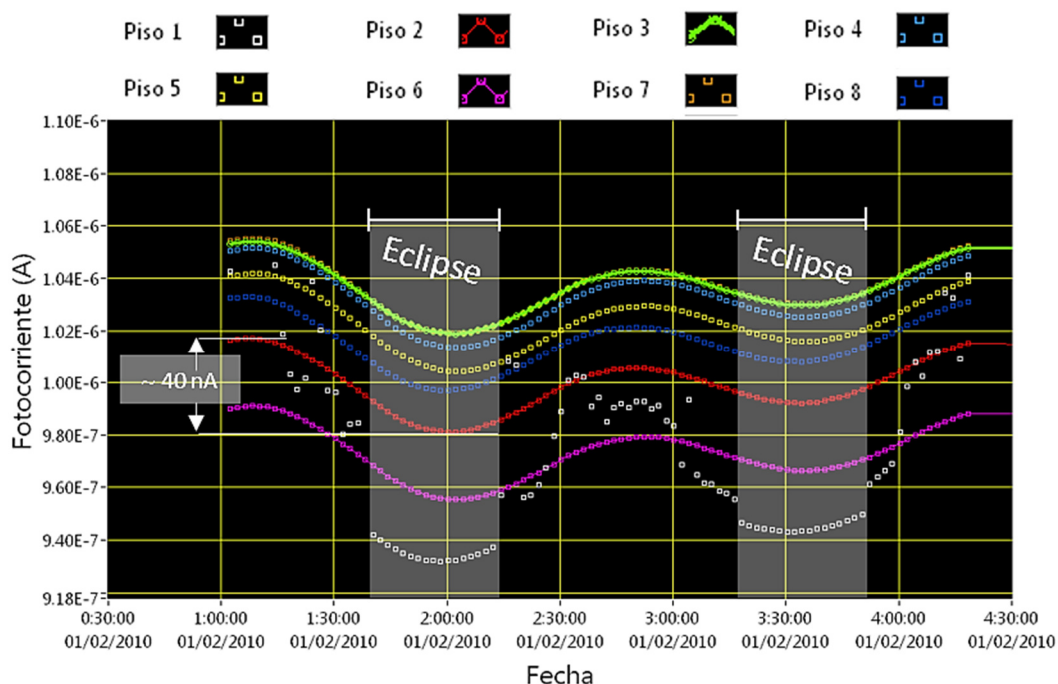


Fig. 7-38. Señales de la fotocorriente de la torre de luz (proporcional a la emisión del LED) expresada en amperios, y sin haber aplicado corrección alguna

En la Fig. 7-39 se han representado los datos anteriores juntos para mostrar la fotocorriente de los LED en función de la temperatura medida por el TMP-36. Se observa una dependencia lineal de pendiente negativa, producto del decaimiento de la emisión del LED con la temperatura.

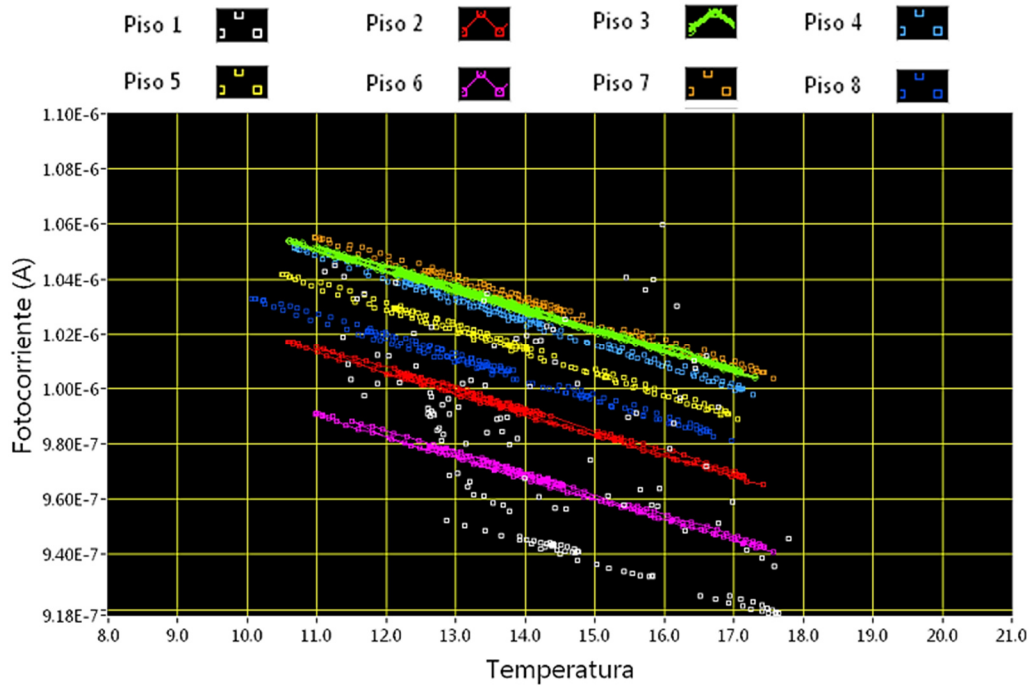


Fig. 7-39. Dependencia lineal de pendiente negativa de la corriente medida en los fotodiodos de la torre de luz, con la temperatura.

Estos valores para los datos de un día completo, se ajustan a la expresión 6-1 obteniendo los parámetros  $m$  y  $b$  que describen la dependencia de la fotocorriente con la temperatura:

$$I(T) = -m(T - 22,7) + b \quad 7-1$$

en donde recordemos que:

- $I$  es la fotocorriente (en amperios) generada en el fotodiodo de un piso cualquiera con su LED encendido. La componente principal de esta corriente es la que se genera por la luz incidente del LED
- $T$  es la temperatura (en grados centígrados) registrada por el sensor TMP-36, pegado en la parte trasera del fotodiodo del piso bajo estudio
- $m$  es la pendiente del ajuste lineal
- $b$  es la corriente que se generaría a una temperatura de 22,7 °C

Este ajuste se realizó desplazando las temperaturas 22,7 °C porque esa fue la temperatura media observada durante la calibración en radiación de esta torre.

Al realizar este ajuste, se extraen además de los parámetros  $m$  y  $b$  sus errores estadísticos, los cuales son usados para la estimación de la incertidumbre de la medida de la señal corregida.

## B. Torre de oscuridad – Determinación de la dependencia térmica

La Fig. 7-40 muestra la temperatura de los 8 canales de la torre de corriente de oscuridad en 2 órbitas de la madrugada del 01/02/2010.

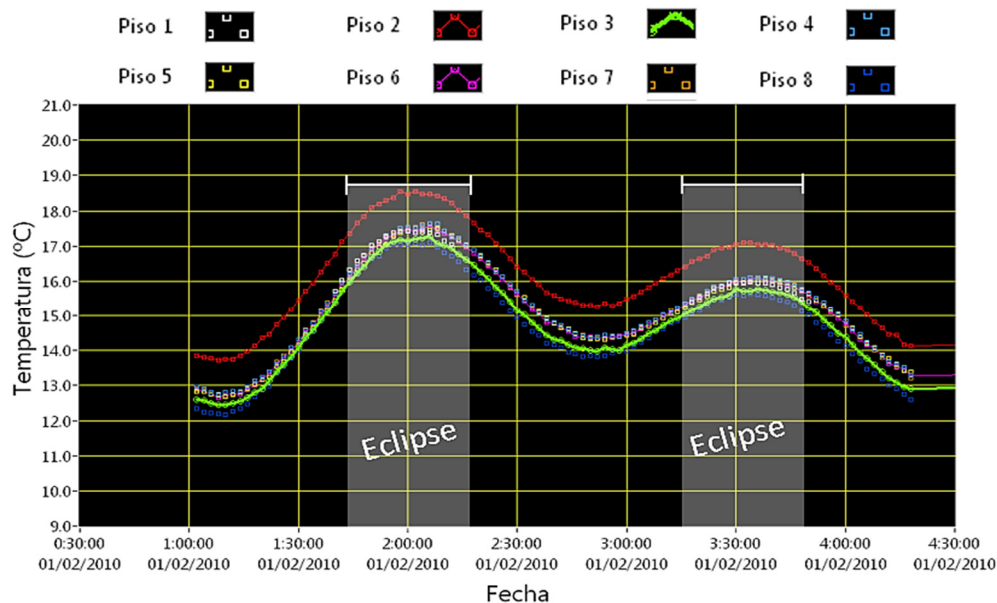


Fig. 7-40. Temperatura medida por los sensores TMP-36 pegados en los fotodiodos de la torre de oscuridad, durante las dos órbitas de la madrugada del 01/02/2010

La Fig. 7-41 muestra la señal, en oscuridad, de los 8 pisos de la torre de fotodiodos, y se señala el aumento temporal de señal producido por el paso por la AAS.

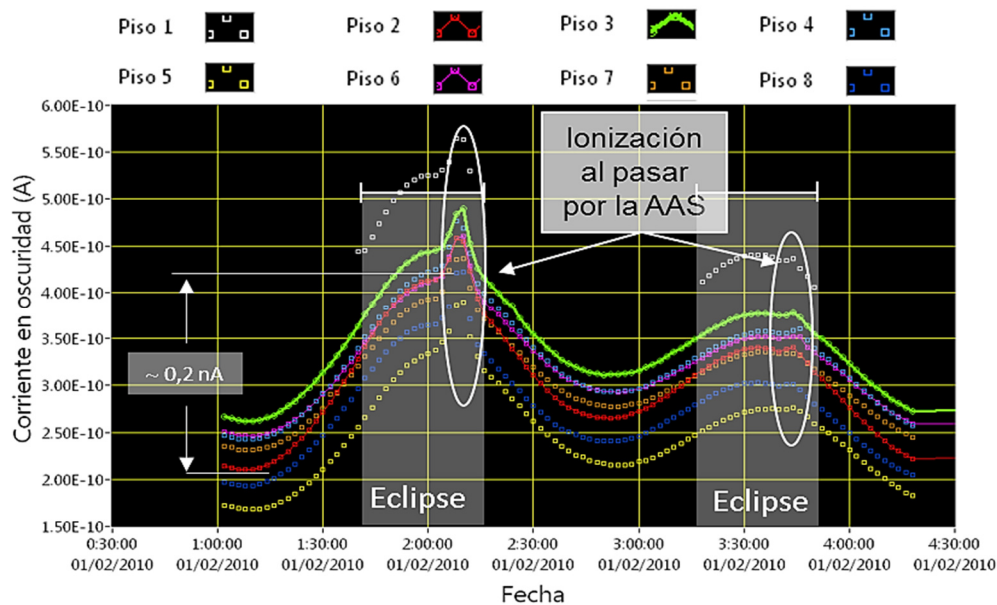


Fig. 7-41. Señal en oscuridad de los fotodiodos de la torre de fotodiodos

En ambas figuras, las variaciones armónicas observadas han sido producidas por las excursiones térmicas entre la zona de eclipse y de luz.

La Fig. 7-42 representa las señales de los fotodiodos en oscuridad frente a la temperatura. Se han eliminado los datos correspondientes a la zona de la AAS, para evitar que la señal de ionización de la AAS afecte en la determinación de los parámetros del ajuste térmico.

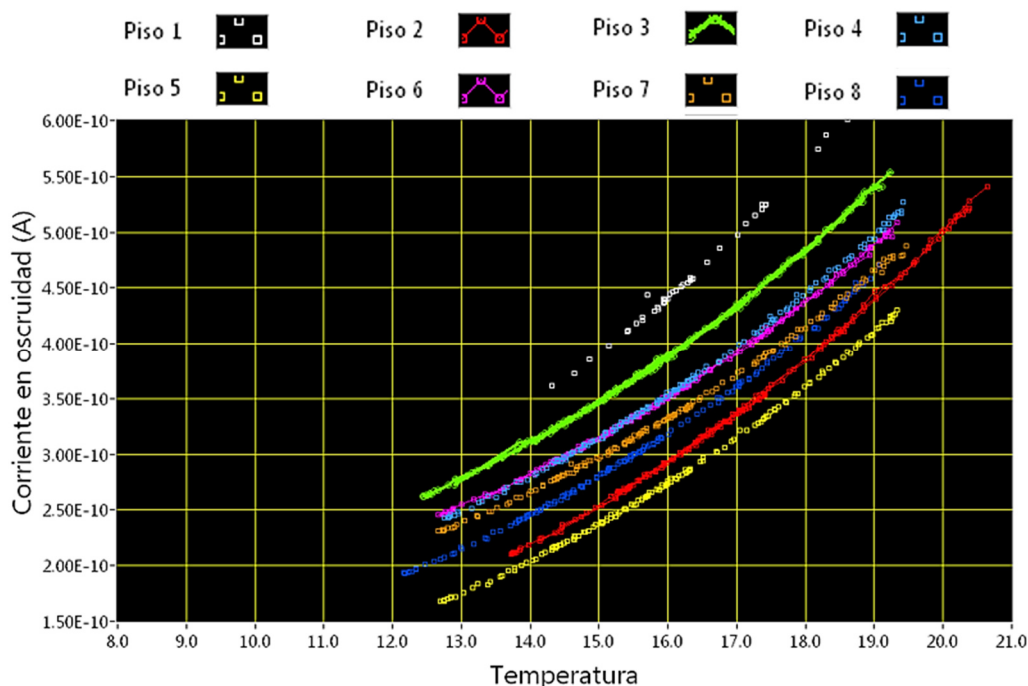


Fig. 7-42. Dependencia de la corriente medida en los fotodiodos de la torre de oscuridad con la temperatura, se aprecia la tendencia exponencial característica de la corriente de oscuridad.

Estos datos se ajustan ahora a la expresión 6-2 pero en esta ocasión omitiendo el *offset*, pues algoritmo implementado para el tratamiento de los datos es algo más rápido y los resultados finales son equivalentes:

$$I(T) = A_0 \cdot e^{(R_o(T-25,7))} \quad 7-2$$

en donde:

- $I(T)$  es la corriente medida en oscuridad de un piso cualquiera.
- $T$  es la temperatura (en grados centígrados) registrada por el sensor TMP-36 pegado en la parte trasera del fotodiodo del piso bajo estudio.

- $R_o$  es un parámetro que determina la sensibilidad a la temperatura de la corriente de oscuridad. Tiene un valor inferior a 1 y la sensibilidad a cambios térmicos es mayor cuanto más cercano a 0 es este parámetro.
- $A_0$  es la corriente en oscuridad que engloba tanto la corriente de oscuridad del fotodiodo, como el *offset* de la electrónica que se hubiera medido a 25,7 °C de temperatura. Esta temperatura fue la temperatura media registrada durante la calibración en las instalaciones del PSI.

#### 7.4.2.2 Aplicación de la corrección térmica

La aplicación de la corrección térmica se basa en despejar de la ecuación que describe el comportamiento térmico, el parámetro que indica el valor que tendría la señal del fotodiodo a la temperatura de referencia. Este parámetro no es el mismo en el caso de la torre de luz que en el de la torre de oscuridad. Se va a explicar cómo se ha procedido en LDT con cada una de las dos torres, mostrando un ejemplo con datos de la explotación.

##### A. Torre de luz – Aplicación de la corrección térmica

Para aplicar la corrección térmica en la torre de LED, se despeja de la expresión 7-1 el término independiente  $b$ , que es la fotocorriente a una temperatura de adquisición de 22,7 °C (la temperatura registrada durante la calibración en radiación):

$$\underbrace{b(m, T, I_{luz})}_{I(T=22,7 \text{ °C})} = m(T - 22,7) + I_{luz}(A) \quad 7-3$$

El valor de  $b$  se puede calcular sin más que sustituir la pendiente del ajuste ( $m$ ), el valor de la señal ( $I$ ) y la temperatura a la que se está midiendo la señal ( $T$ ). De esta forma, se obtiene la fotocorriente que se hubiera medido una temperatura de 22,7 °C.

Aplicando esta operación sobre los datos de la Fig. 7-38 y la Fig. 7-39, se obtiene la Fig. 7-43, cuyo eje de ordenadas representa el término  $b$ . Se aprecia que se ha pasado de una amplitud de las modulaciones térmicas de ~ 40 nA (Fig. 7-38) a una de ~ 3,5 nA (datos del piso 2). Aquí es donde se detecta si el valor de  $m$  está actualizado, y el motivo de tener que realizar la recalibración térmica en órbita. Se ha comprobado que mes a mes, si no se actualiza el valor de la pendiente, la variación mostrada aquí de ~ 3,5 nA va aumentando lentamente. El mismo efecto se ha visto con las corrientes de oscuridad pero siendo su evolución más rápida.

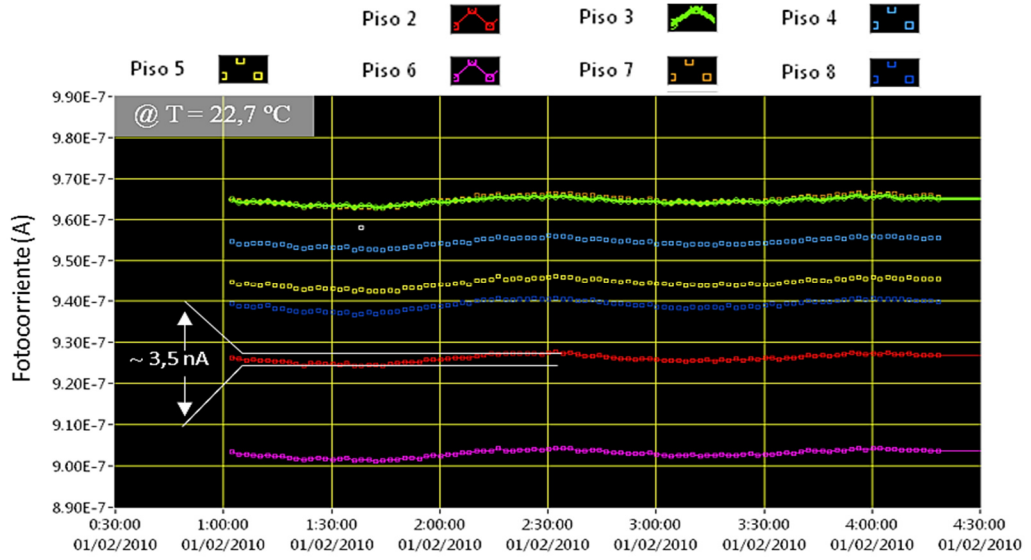


Fig. 7-43. Fotocorriente de los fotodiodos de la “torre de luz” tras la corrección térmica

La incertidumbre de la fotocorriente corregida se calcula a partir de

$$\epsilon_b = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial T} \cdot \epsilon_T\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial FC} \cdot \epsilon_{I_{luz}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial m} \cdot \epsilon_m\right)^2} \quad 7-4$$

y se obtiene que

$$\epsilon_b = \sqrt{(m \cdot \epsilon_T)^2 + (\epsilon_I)^2 + ((T - 22,7) \cdot \epsilon_m)^2} \quad 7-5$$

en donde:

- $\epsilon_T$  es la precisión<sup>23</sup> de la señal de la temperatura.
- $\epsilon_{I_{luz}}$  es la precisión<sup>23</sup> de señal de la fotocorriente.
- $\epsilon_m$  es el error estadístico del parámetro  $m$  obtenido en el ajuste lineal.

Se observa que no se ha corregido totalmente la dependencia térmica, algo que si se conseguirá con la torre de oscuridad. Una posible explicación es que los sensores de temperatura (TMP-36) están sobre los fotodiodos, y por eso la temperatura del LED se determina con más incertidumbre. El hecho de que el LED sufre un autocalentamiento debido al paso de la corriente que lo alimenta, también influye negativamente.

<sup>23</sup> Se recuerda que las TM descargadas de LDT incluyen la desviación estándar de la media del dato medido (Fig. 7-36). Esta desviación estándar es la que se toma como precisión de la medida.



La fotocorriente que se ha medido es proporcional a la potencia óptica que emite el LED, que es la magnitud que decae con los DD acumulados. Esta señal es la que se ha calibrado en función de la fluencia de protones del acelerador, y la que se usará para calcular la TNID.

### B. Torre de oscuridad – Aplicación de la corrección térmica

Para iniciar el proceso de la corrección térmica de la señal de oscuridad de los fotodiodos de la torre de oscuridad, se despeja el término  $A_o$  de la ecuación 7-2, obteniendo:

$$\underbrace{A_0(R_o, T, I_{osc.})}_{I(T=25,7\text{ }^{\circ}\text{C})} = \frac{I_{osc.}(A)}{e^{(R_o(T-25,7))}} \quad 7-6$$

Se recuerda que este parámetro es la corriente que se habría obtenido si la temperatura hubiera sido de 25,7 °C. Así pues, sustituyendo los datos experimentales medidos en órbita (la señal de la corriente en oscuridad y la temperatura medida por el TMP36) y los parámetros de la dependencia térmica, se obtiene el valor de la corriente a la temperatura de referencia (25,7 °C).

En la Fig. 7-44 se muestran los datos corregidos ( $A_o$ ) de la corriente de los fotodiodos de la torre de oscuridad, que habían sido mostrados en la Fig. 7-41 y la Fig. 7-42.

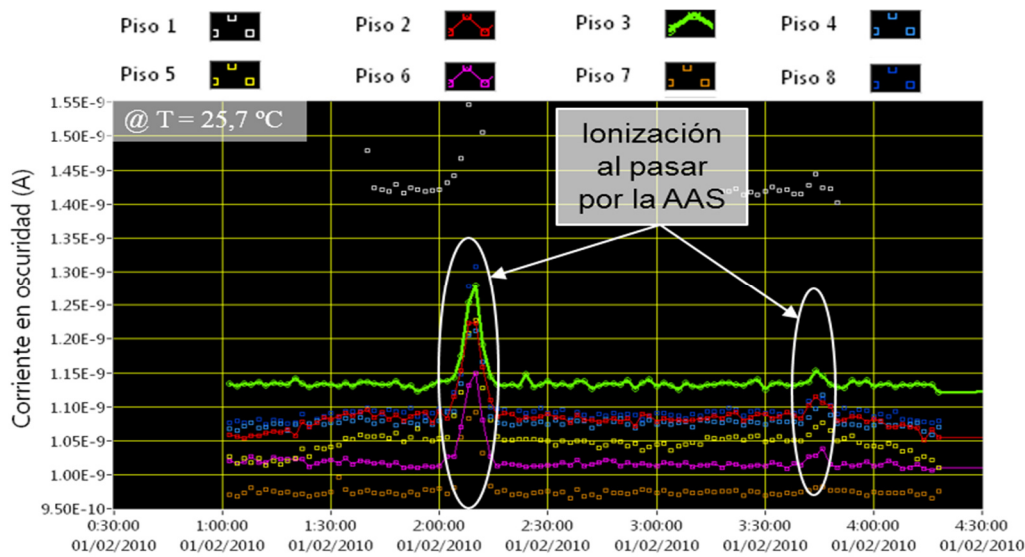


Fig. 7-44. Corriente en oscuridad de la “torre de oscuridad” después de la corrección térmica.

El resultado mostrado deja de manifiesto como **la señal de oscuridad de cada piso es ahora independiente de la temperatura**, pues, al contrario de lo que pasaba con la fotocorriente en la torre de luz, no se observa la forma armónica producida por la excursión térmica de la órbita. Sin embargo, sí se observan los picos de ionización del paso por la AAS. La incertidumbre de este término viene dada por:

$$\epsilon_{Ao} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{I_{osc.}}}{e^{(R_o(T-25.7))}}\right)^2 + \left(\frac{I_{osc.}R_o}{e^{(R_o(T-25.7))}}\epsilon_T\right)^2 + \left(\frac{I_{osc.}(T-25.7)}{e^{(R_o(T-25.7))}}\epsilon_{R_o}\right)^2} \quad 7-7$$

en donde:

- $\epsilon_{I_{osc.}}$  es la precisión<sup>24</sup> de la señal de la corriente de oscuridad.
- $\epsilon_T$  es la precisión<sup>24</sup> de la señal de la temperatura.
- $\epsilon_{R_o}$  es el error estadístico del parámetro  $m$  obtenido en el ajuste lineal.

Esta señal tiene dos contribuciones dependientes de la radiación que deben ser separadas: el nivel de base, que es la corriente de oscuridad y proporcional a los DD acumulados, y los picos de ionización cuyo aumento transitorio es proporcional al flujo.

### 7.4.3 Separación de los efectos de DD e ionización

La señal de la corriente de oscuridad está modulada por dos efectos de la radiación: efectos de DD y efectos de ionización. Estos deben de ser identificados y separados para evaluarlos de manera independiente. Los DD aumentan lentamente (a razón de 1,9 pA/día, como se mostrará en los resultados), por ello se evalúa su cambio con la media de las corrientes obtenidas en todo un día o, incluso, en todo un mes. Como las medidas de un día incluyen los datos de los DD y los efectos transitorios de la ionización al atravesar la AAS, es necesario eliminar los datos correspondientes a esta ionización antes de evaluar la TNID a fin de no alterar así su valor.

Para eliminar estos datos, lo primero es identificarlos. Su valor se calcula mediante la diferencia entre la medida obtenida en órbita (Fig. 7-41) y la señal teórica (ecuación 7-2 del ajuste térmico):

<sup>24</sup> Se recuerda que las TM descargadas de LDT incluyen la desviación estándar de la media del dato medido (Fig. 7-36). Esta desviación estándar es la que se toma como precisión de la medida.

$$\Delta I_{Ion}(A) = \underbrace{I_{Osc.}(A)}_{\text{Señal medida en orbita}} - \underbrace{A_o \cdot e^{(R_o(T - 25.7))}}_{\substack{\text{Señal teórica:} \\ \text{Ec.7-2}}} \quad 7-8$$

en donde  $\Delta I_{Ion}(A)$  es la corriente de ionización instantánea producida en cada piso de LDT. Esta magnitud se ha representado en la Fig. 7-45 con los datos de la Fig. 7-41.

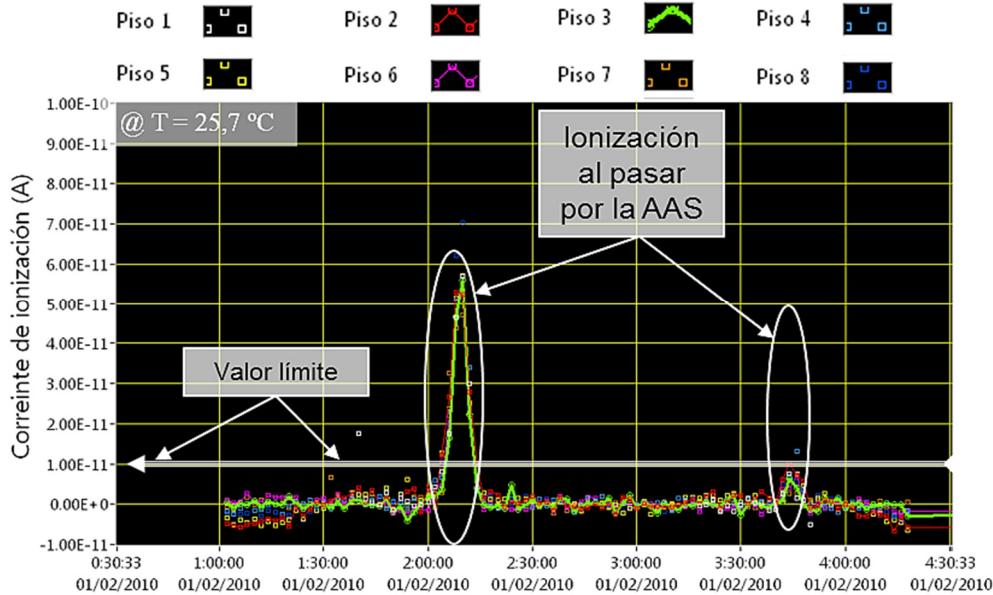


Fig. 7-45. Corriente de ionización de la torre de oscuridad

Esta señal es la corriente de ionización que se había calibrado en el acelerador a 25,7 °C. La incertidumbre se puede calcular a partir de

$$\varepsilon_{\Delta I_{Ion}} = \sqrt{\varepsilon_{I_{Osc.}}^2 + (A_o R_o e^{(R_o(T-25.7))} \varepsilon_T)^2 + (A_o (T - 25,7) e^{(R_o(T-25.7))} \varepsilon_{R_o})^2 + (e^{(R_o(T-25.7))} \varepsilon_{A_o})^2} \quad 7-9$$

en donde:

- $\varepsilon_{I_{Osc.}}$  es la precisión de medida de la corriente de oscuridad.
- $\varepsilon_T$  es la precisión en la determinación de la temperatura.
- $\varepsilon_{R_o}$  es el error estadístico del parámetro  $R_o$  obtenido en el ajuste lineal.
- $\varepsilon_{A_o}$  es el error estadístico del parámetro  $A_o$  del ajuste exponencial.

Para identificar los datos que deben ser eliminados de la señal de los DD se establece un valor límite en la corriente de ionización, y todos aquellos datos tal que su corriente de ionización es mayor que dicho límite, son retirados de la señal de los DD.

El valor establecido para este umbral es el que fue marcado en la Fig. 7-45 con una línea blanca, correspondiente a  $10^{-11}$  A. Además de eliminar el punto que supera esta cota, se elimina el siguiente y el anterior para asegurarse de que se está fuera del radio de acción de la ionización detectada.

Este método de marcar un umbral tiene algunas limitaciones que pueden introducir incertidumbres en la medida. En el caso concreto que se ha mostrado (Fig. 7-45), el pico de las 3:45 no se identifica como corriente de ionización y se ha calculado que puede llegar a sobreestimar el TNID en un 3%. Esta situación es excepcional, y se produce solo si la órbita de medida pasa por un borde de la AAS. Para reducir esta incertidumbre al 0,6% basta con usar datos que sean la media de un mes entero, en los que el número de veces que se pasa por un borde de la AAS queda amortiguado frente al resto. No obstante, este efecto es despreciable si se comparan periodos de tiempo con activaciones similares, pues afecta de la misma forma a todos los periodos.

Podría parecer que bajar el límite de detección ayudaría a evitar este efecto, pero, en ese caso, el aumento del ruido llevaría a la eliminación de puntos que no son realmente producidos por un aumento de la ionización. Por ejemplo, en los datos del día 06/02/2014, mostrados en la Fig. 7-46, el ruido de la señal de ionización del piso 3 superó el valor límite en varias ocasiones. Si en este día se bajara un poco más este límite se podría perder toda la información de los DD. Se ha observado que el ruido de las señales aumenta paulatinamente con el tiempo, cuando el ruido sobrepase este valor límite será imprescindible buscar otro método para la detección de la señal de ionización.

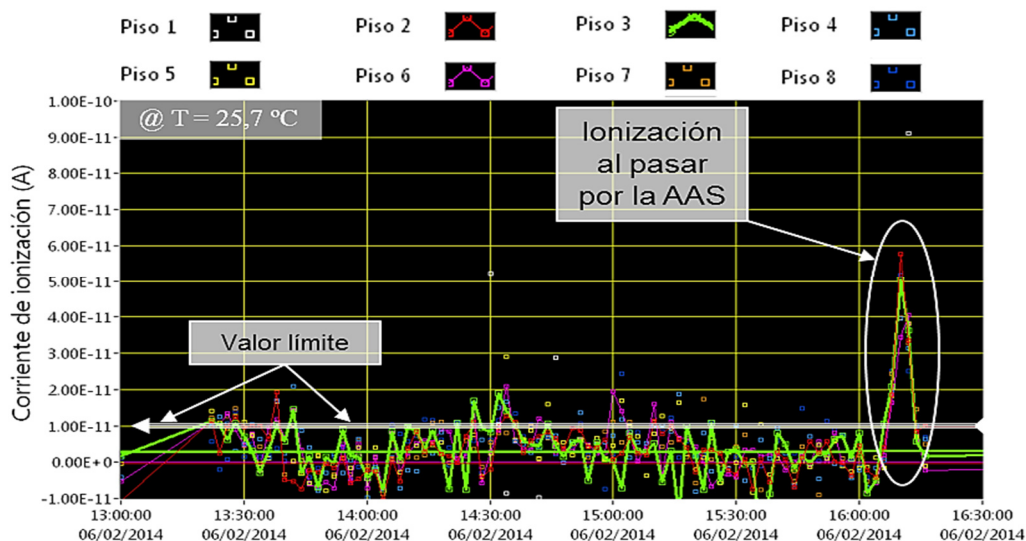


Fig. 7-46. Corriente de ionización de la torre de oscuridad de un día con una señal altamente ruidosa

Recapitulando, de los datos de la corriente de oscuridad de la torre de fotodiodos de LDT se obtienen dos señales que proporcionan información sobre dos magnitudes:

- La corriente de ionización, que es directamente proporcional al ritmo de ionización o flujo de  $p^+$ .
- La corriente de oscuridad, cuya diferencia entre dos fechas es proporcional a los DD y a la TNID acumulada en ese intervalo de tiempo.

Este proceso descrito es válido también para las señales de oscuridad de los fotodiodos de la torre de luz, y así se hará si se da el caso de que la torre de oscuridad, que tiene un rango dinámico menor, llega a saturar.

## 7.5 Conclusiones

Tras el proceso aquí descrito, los datos están listos para su análisis, están en el último paso que fue mostrado en la Fig. 7-35. Es decir, se tendrán tres señales independientes de la temperatura:

- La **señal de la fotocorriente** de la torre de luz que es proporcional a la TNID.
- La **señal de la corriente de oscuridad** que también es proporcional a la TNID.
- La **señal de corriente de ionización** que es proporcional al ritmo de ionización, o en este caso concreto al flujo de protones. Esta señal se puede extraer en ambas torres, pero la torre de luz solo se puede usar cuando la torre de oscuridad, que es más sensible, satura.

## 8 Explotación – Resultados en órbita

*Se describen los métodos de cálculo que se han usado para obtener la TNID y el flujo de protones. Se explica también como con esa información se pueden reconstruir los mapas de la AAS, y cómo detectar una tormenta solar. Se muestra que existen métodos directos e indirectos para medir algunos de estos parámetros, se comparan los resultados obtenidos entre ellos, demostrando que son equivalentes.*

*Se muestran los resultados obtenidos en estos 5 años de explotación, y se comparan con las simulaciones realizadas, los RadFET de referencia, y otros monitores de radiación, con el fin de verificar el buen funcionamiento de LDT.*

## 8.1 Introducción

El capítulo anterior terminó con la descripción del tratamiento de datos que consigue que las señales de LDT sean independientes de la temperatura y proporcionales a los DD (o TNID) o, según el caso, a los efectos transitorios de ionización.

En este capítulo, que se ha dividido en dos secciones, se describe, primeramente, el procedimiento de análisis para obtener los parámetros del entorno de radiación (§8.2) y, posteriormente, se aplica este a los datos descargados de los 5 años de explotación del instrumento, y se comparan los resultados con las simulaciones, con los modelos de protones atrapados y con otros monitores (§8.3).

## 8.2 Procedimiento de análisis

En este apartado se va a describir el proceso que se ha seguido para analizar las señales corregidas en temperatura y obtener los datos del TNID y los mapas de la AAS. La sección se ha dividido en tres apartados: en el primero (§8.2.1) se explica como analizar los efectos de ionización para calcular el flujo instantáneo de protones y, con ello, construir los mapas de la AAS; en el segundo (§8.2.2) se describe cómo medir los efectos de los DD, los cuales se pueden evaluar de forma directa a través del propio efecto que los DD provocan en los sensores, o de forma indirecta usando los efectos de ionización; y por ultimo (§8.2.3) se describe como se detectan las tormentas solares.

### 8.2.1 Efectos de ionización

#### 8.2.1.1 Flujo equivalente instantáneo

El flujo instantáneo que atraviesa un piso de LDT es proporcional al incremento de la corriente de ionización, en donde el factor de proporcionalidad es el que se ha denominado sensibilidad al flujo, y que fue obtenido experimentalmente durante las calibraciones de LDT descritas en §6.3.2.

Despejando de [2-5], para calcular el flujo equivalente de protones de una energía determinada ( $\phi_{Eq.}$ ), se obtiene:

$$\phi_{Eq.} = \frac{\Delta I_{Ion}}{K_{ion}} \quad 8-1$$

en donde:

- $\Delta I_{Ion}$  es la corriente de ionización medida por un piso de LDT.

- $K_{ion}$  es la sensibilidad a la ionización a los protones de una energía determinada.

La sensibilidad a la ionización se midió con protones de diferentes energías durante el ensayo de calibración.

La incertidumbre de  $\phi_{Eq.}$  se estima a partir de

$$\varepsilon_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\Delta I_{Ion}}}{K_{Ion}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{Ion} \cdot \varepsilon_{K_{Ion}}}{K_{Ion}^2}\right)^2} \quad 8-2$$

en donde:

- $\varepsilon_{\Delta I_{Ion}}$  es la incertidumbre de la señal de ionización (ecuación 7-9).
- $\varepsilon_{K_{Ion}}$  es el error estadístico de la sensibilidad al flujo, que fue calculado durante la calibración del instrumento.

Se van a contemplar dos casos, el caso del flujo expresado en equivalentes de los protones de la energía umbral y el caso de los protones equivalentes de la energía más alta a la que se calibró LDT.

#### A. Flujo equivalente de $p^+$ de energía umbral

Las **sensibilidades al flujo** de los diferentes pisos, a distintas energías, que se obtuvieron durante la calibración, han sido ordenadas en las **matrices de sensibilidad**. Los elementos de la diagonal de estas matrices son las sensibilidades al flujo de los protones de energía umbral de cada piso. Se han extraído estos elementos y se muestran en Tabla 8-1, junto a su incertidumbre.



Tabla 8-1. Sensibilidad de la torre de oscuridad al flujo equivalente frontal de protones umbrales<sup>25</sup>. Corresponde a la diagonal de la matriz de sensibilidad de la torre de oscuridad (Apéndice D)

Piso	Sensibilidad frontal al flujo	Sensibilidad expresada en protones equivalentes de energía	Error estadístico	
	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[MeV]	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[%]
Piso 1	129,3	10,67	3,4	2,6%
Piso 2	69,0	28,78	7,1	10%
Piso 3	94,3	40,90	3,3	3,5%
Piso 4	29,7	50,41	5,3	18%
Piso 5	44,33	58,74	0,75	1,7%
Piso 6	46,44	63,54	0,85	1,8%
Piso 7	41,9	70,67	1,8	4,2%
Piso 8	48,36	80,10	0,93	1,9%

De la diagonal de la matriz de sensibilidades al flujo frontal de la torre de luz, se obtienen las sensibilidades a los protones frontales de energía umbral de la corriente de oscuridad de la torre de luz.

Tabla 8-2. Sensibilidad de la torre de luz al flujo equivalente frontal de protones umbrales<sup>25</sup>. Corresponde a la diagonal de la matriz de sensibilidad de la torre de luz (Apéndice D)

Piso	Sensibilidad frontal al flujo	Sensibilidad expresada en protones equivalentes de energía	Error estadístico	
	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[MeV]	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[%]
Piso 1	179,0	10,67	1,0	0,57
Piso 2	87,9	28,78	1,6	1,8
Piso 3	79,2	40,90	1,4	1,7
Piso 4	73,2	50,41	2,5	3,4
Piso 5	52,5	58,74	3,2	6,0
Piso 6	52,59	63,54	0,22	0,41
Piso 7	43,1	70,67	1,3	3,0
Piso 8	49,17	80,10	0,22	0,43

Esta sensibilidad al flujo, y sus incertidumbres, son los datos a sustituir, en las expresiones 8-1 y 8-2, para calcular el flujo equivalente de protones frontales de la energía umbral de un piso. Los datos de la torre de LED solo se usarán si el flujo supera el umbral de sensibilidad de esta torre. Para poder comparar estos valores entre unos pisos y otros, es más adecuado expresar esta magnitud en equivalentes de protones de la misma energía.

<sup>25</sup> Protón umbral se refiere a la energía del haz de irradiación que produce un efecto similar al que produciría si incidieran protones con la energía umbral del piso bajo estudio.

## B. Flujo equivalente de protones de 80,10 MeV

Para expresar todos los valores en equivalentes de la misma energía, se usan las sensibilidades de la corriente de oscuridad a protones de la misma energía. Es decir, en vez de usar los términos de la diagonal de la matriz de sensibilidades, se usan los términos de una columna. La columna elegida debe corresponder a una energía que alcance a todos los pisos, esto es, una energía alta. En este caso la única opción es usar la columna de la energía umbral del último piso. Estos datos, la sensibilidad a protones frontales de 80,10 MeV, han sido recogidos en la Tabla 8-3 para el caso de la torre de fotodiodos, y en la Tabla 8-4 para el de la torre de LED.

Tabla 8-3. Sensibilidad de la torre de oscuridad al flujo equivalente frontal de protones de 80,10 MeV. Columna octava de la matriz de sensibilidad de la torre de oscuridad (Apéndice D).

Piso	Sensibilidad frontal al flujo	Sensibilidad expresada en protones equivalentes de energía	Error estadístico	
	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]		[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[%]
Piso 1	29,9	80,10	1,0	3,5%
Piso 2	33,27		0,77	2,3%
Piso 3	36,8		1,0	2,8%
Piso 4	43,42		0,71	1,6%
Piso 5	37,0		1,0	2,8%
Piso 6	34,32		0,97	2,8%
Piso 7	36,74		0,91	2,5%
Piso 8	48,36		0,93	1,9%

Tabla 8-4. Sensibilidad de la torre de luz al flujo equivalente frontal de protones de 80,10 MeV. Columna octava de la matriz de sensibilidad de la torre de luz (Apéndice D).

Piso	Sensibilidad frontal al flujo	Sensibilidad expresada en protones equivalentes de energía	Error estadístico	
	[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]		[fA/s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	[%]
Piso 1	29,66	80,10	0,15	0,51%
Piso 2	32,55		0,18	0,55%
Piso 3	36,32		0,19	0,51%
Piso 4	43,78		0,21	0,48%
Piso 5	36,68		0,16	0,44%
Piso 6	35,31		0,13	0,36%
Piso 7	37,87		0,18	0,47%
Piso 8	49,17		0,21	0,43%

Al igual que sucedió en el caso de las sensibilidades a las energías umbrales, estos son los datos a sustituir en las expresiones 8-1 y 8-2 para determinar el flujo equivalente a protones frontales, pero esta vez, de energía 80,10 MeV. Los datos de la torre de LED solo se usarán si el flujo supera el umbral de detección.

El cálculo del flujo tiene implicaciones importantes relacionadas con la verificación del funcionamiento de LDT, como es la de construir los mapas de la AAS para compararlos con los modelos de protones atrapados (§8.2.1.2), o la de calcular el TNID por un método indirecto (§8.2.2.2) para comparar con el resultado obtenido por el método directo (§8.2.2.1). Además es la base de la detección de tormentas solares (§8.2.3)

#### **8.2.1.2 Mapas de la AAS – Modelo Experimental Local de Protones de Nansoat-1B**

El valor del flujo en torno a la Tierra es un campo escalar. Los mapas de la AAS son una representación de este campo de flujo.

Dichos mapas, se construyen ordenando geográficamente los datos del flujo instantáneo medido por LDT y representando estos valores sobre un mapamundi. En estos mapas, cada medida se representa por un punto cuyo color indica el valor del flujo. Esta nube de puntos se usa para definir el campo escalar que representa el valor del flujo medio de la AAS, en una época determinada de la explotación de LDT.

Se han establecido 12 capas de 10 km de espesor, entre las alturas de 585 km y 695 km. Cada mapa está construido con los datos adquiridos durante un periodo de ~ 2 años, tiempo necesario para acumular suficientes medidas de la mayor parte del volumen de la AAS que sobrevuela NANOSAT. Si se divide el volumen de la AAS por los que orbita NANOSAT en paralelepípedos de  $4^{\circ} \times 4^{\circ} \times 10$  km (*latitud*  $\times$  *longitud*  $\times$  *altura*), transcurrido este tiempo cada una de estas “cajitas” habrá sido medida, al menos, una vez, y la mayoría de ellas entre 2 y 3 veces. La Fig. 8-1 muestra cuatro mapas de flujo de datos correspondientes a una altura media de 675 km. Cada uno de ellos corresponde a una acumulación de datos de 6, 12, 18 y 24 meses respectivamente. Se observa como hasta los 24 meses el área de la AAS no está bien tapizada.

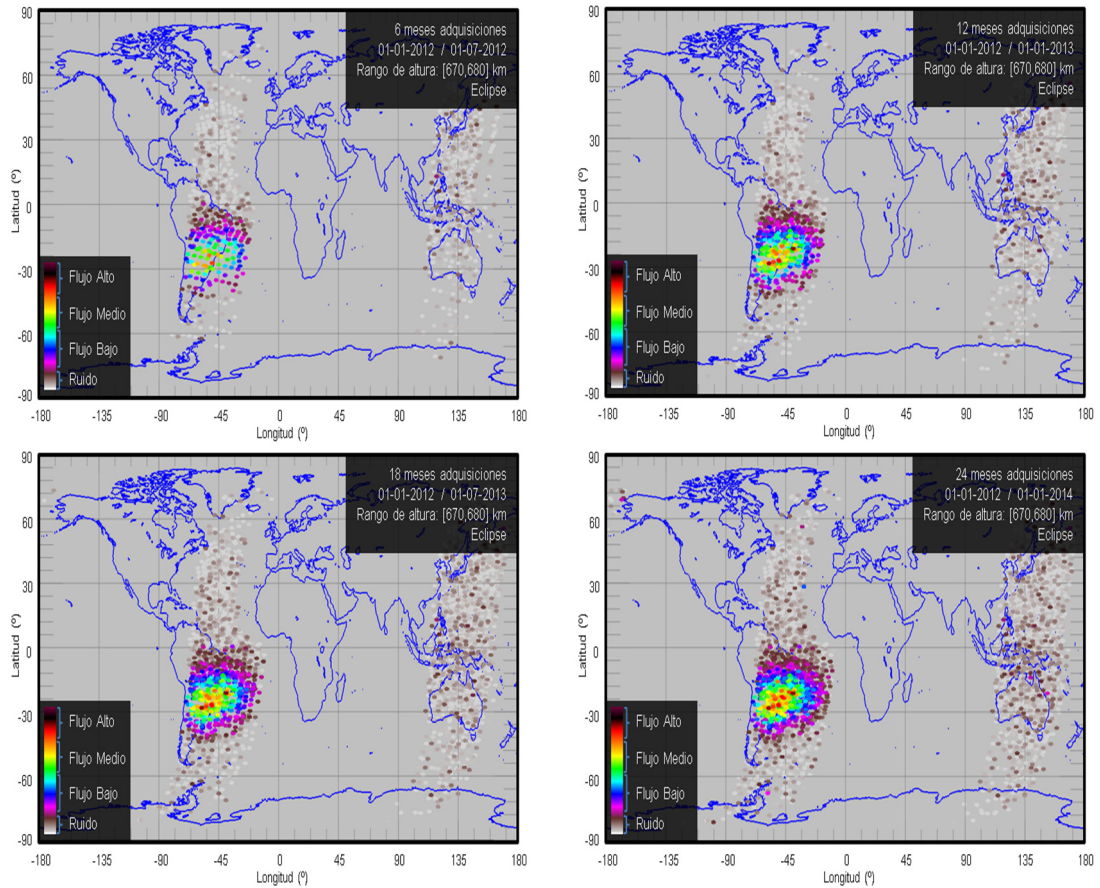


Fig. 8-1. Mapas de flujo a una altura de 675 km con datos acumulados durante 6, 12, 18 y 24 meses

De las 12 capas de distintas alturas, solo cubren el área completa de la AAS las diez centrales. Esto se aprecia en la Fig. 8-2, en la que se muestran los mapas de la capa más alta (685 km) y de la más baja (585 km). Se observa como la más alta solo cubre la parte sur de la AAS y la más baja solo la zona norte.

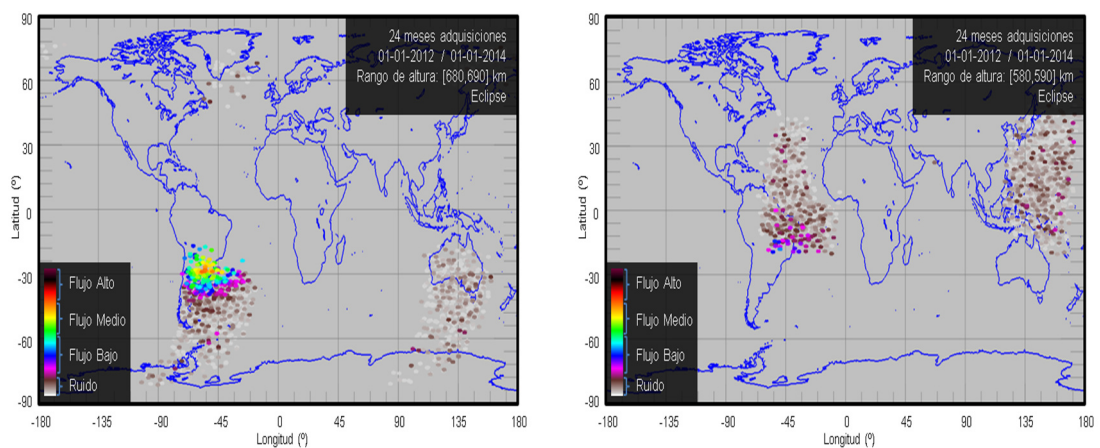


Fig. 8-2. Acumulación de 24 meses de datos en la capa más alta (685 km) y la más baja (585 km)

Como se han obtenido estos datos a lo largo de 5 años, se ha dividido en 4 periodos de tiempo que se solapan 12 meses entre sí:

Tabla 8-5 Intervalos de acumulación de datos para la generación de los mapas de flujo orbitales

Intervalo	Fecha de inicio	Fecha de fin	Duración [meses]
[2010 – 2011]	01 / 01 / 2010	01 / 01 / 2012	24
[2011 – 2012]	01 / 01 / 2011	01 / 01 / 2013	24
[2012 – 2013]	01 / 01 / 2012	01 / 01 / 2014	24
[2013 – 2014]	01 / 01 / 2013	05 / 12 / 2014	23

Toda esta información se ha organizado y almacenado en un total de 768 matrices en las que cada celda de la matriz contiene el flujo medio medido en una posición latitud-longitud de la Tierra. Las diferencias entre unas matrices y otras estriban en que los datos almacenados corresponden a diferente intervalo temporal (4 intervalos), diferente altura de adquisición (12 capas), diferente piso de LDT (8 pisos) y distinta posición relativa entre el Sol, la Tierra y el satélite (dos opciones: en eclipse o no).

$$\underbrace{4}_{\text{intervalos}} \times \underbrace{12}_{\text{capas}} \times \underbrace{8}_{\text{pisos}} \times \underbrace{2}_{\substack{\text{estado de} \\ \text{iluminacion:} \\ \text{eclipse o NO eclipse}}} = \underbrace{768}_{\text{MATRICES}}$$

8-3

Esta base de datos forma lo que se ha denominado *Modelo Operativo de Protones atrapados de NANOSAT-1B* (MOLPN). Este modelo operativo es un modelo experimental local en tiempo y en espació, pues está restringido a las alturas por las que ha pasado NANOSAT y al periodo temporal de la explotación de LDT. Cada dato de estas matrices, o de este MOLPN, es el flujo medio medido en el volumen del paralelepípedo de  $4^\circ \times 4^\circ \times 10 \text{ km}$  (*latitud*  $\times$  *longitud*  $\times$  *altura*) durante los datos de 2 años.

Los datos del MOLPN se han comparado con los modelos más usados de protones atrapados (AP-8, CRRESPRO, PSB97) para verificar el funcionamiento de LDT. Los parámetros utilizados para la comparación han sido dos: el valor del flujo medio máximo de la AAS y sus coordenadas geográficas. Además se ha evaluado la forma de la AAS de un modo subjetivo.

Los resultados se muestran en la sección de resultados (§8.3.2). Se puede adelantar que el comportamiento ha sido satisfactorio, y que el modelo con el que se obtienen resultados más similares al nuestro es el PSB97 [PSB97], que es un modelo específico para órbitas LEO como la de NANOSAT-1B.

Este modelo experimental es una pieza clave del procedimiento de detección de tormentas solares (§8.2.3), y podría ser utilizado para predecir el TNID acumulado por un satélite con una órbita similar a la de NANOSAT, que esté activo durante el mismo periodo temporal.

## **8.2.2 Efectos de DD – TNID**

Existen dos métodos para determinar la TNID con LDT: el método directo y el método indirecto. El directo se basa en los efectos macroscópicos observables<sup>26</sup> que los DD provocan en los sensores y que han sido calibrados en el acelerador del PSI. El método indirecto se basa en la relación que hay entre el flujo y la fluencia [1-3], en donde la fluencia es la integral en el tiempo del flujo. Gracias a esta relación se podrá integrar los datos del flujo e inferir, con ello, la TNID.

Se va a describir como obtener la TNID por ambos métodos. Posteriormente, en la sección de resultados (§8.3.3), se compararán entre sí.

### **8.2.2.1 Método directo: uso de los factores de daño**

Independientemente de con que torre se esté operando, la fluencia acumulada de protones, en un plazo de tiempo concreto, es proporcional al cambio observado en la corriente medida en el fotodiodo. En el caso de la torre de luz, esta corriente es la fotocorriente generada por la iluminación del LED asociado. En la torre de fotodiodos, se trata de la corriente en oscuridad. El factor de proporcionalidad es el factor de daño que fue obtenido durante las calibraciones del instrumento. En el primer caso, es el factor de daño de la fotocorriente, y en el segundo, el factor de daño de la corriente de oscuridad. Estos factores de daño fueron determinados para diferentes energías de protones. En función del factor de daño que se use, el resultado estará expresado en un equivalente de protones de una energía u otra. Se establecen dos casos en función de la energía de los protones, uno con los factores de daño de los protones de energía umbral de cada piso y,

---

<sup>26</sup> Que son el aumento de la corriente de oscuridad, y el decaimiento de la emisión óptica del LED.

el otro, con los factores de daño de los protones de la energía más alta usada en la calibración, que es 80,10 MeV.

Las señales de corriente con las que se trabajará son las señales preparadas para el análisis (§7.4), y que conviene recordar que son independientes de la temperatura.

Tanto para la torre de luz como para la de oscuridad el siguiente paso para determinar la TNID es calcular la variación de la corriente correspondiente entre las dos fechas en las que se quiera evaluar la fluencia acumulada:

$$\Delta I_t = I_{t_f} - I_{t_o} \quad 8-4$$

en donde:

- $I_{t_o}$  es la corriente (corregida con la temperatura) obtenida en el instante inicial
- $I_{t_f}$  es la corriente (corregida con la temperatura) obtenida en el instante en el que se desea conocer la fluencia acumulada

Estas  $I_{t_o}$  y  $I_{t_f}$  se calculan en la torre de luz usando la ecuación 7-3, y en el caso de la torre de oscuridad usando ecuación 7-6, siempre tras eliminar la corriente de ionización (§7.4.3).

La incertidumbre de esta magnitud viene expresada por:

$$\epsilon_{\Delta I_t} = \sqrt{\epsilon_{I_f}^2 + \epsilon_{I_o}^2} \quad 8-5$$

La fluencia equivalente ( $\Phi_{Eq.}$ ) se calcula a partir de la ecuación 4-7:

$$\Phi_{Eq.} = \frac{\Delta I_t}{K_{annealing}(t) \cdot K_{DD}} \quad 8-6$$

en donde:

- $\Delta I_t$  es la variación de corriente corregida térmicamente entre dos fechas determinadas obtenida de 8-4.
- $K_{DD}$  es el factor de daño a protones de una energía determinada que fue obtenido en la calibración.

- $K_{annealing}(t)$  es un el factor de corrección determinado por la recuperación natural del dispositivo o “*annealing*”, que viene dado por la ecuación 4-5.

La incertidumbre se calcula a partir de:

$$\epsilon_{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\Delta I_t}}{K_{Annealing} K_{DD}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_t \cdot \epsilon_{K_{DD}}}{K_{Annealing} K_{DD}^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_t \cdot \epsilon_{K_{Annealing}}}{K_{Annealing}^2 K_{DD}}\right)^2} \quad 8-7$$

en donde:

- $\epsilon_{\Delta I_t}$  es la incertidumbre de la variación de las corrientes corregidas térmicamente entre dos fechas diferentes
- $\epsilon_{K_{DD}}$  es la incertidumbre del factor de daño (calculado durante la calibración del instrumento)
- $\epsilon_{K_{Annealing}}$  es la incertidumbre del factor de corrección de *annealing*

El factor de corrección de *annealing* es común para todos los pisos e independiente de la energía en el rango de trabajo. Fue estimado en §4.3.1.2, para el caso de los fotodiodos, y en §4.3.2.2 para el caso de los LED. Se presenta en la Tabla 8-6 el correspondiente a la torre de fotodiodos y en la Tabla 8-7 el de la torre de LED, junto a sus incertidumbres.

Tabla 8-6. Factor de corrección de la recuperación (*annealing*) de la corriente de oscuridad para aplicar en la torre de fotodiodos. Fue discutido en § 4.3.1.2.

Piso	$K_{Annealing}$	$\epsilon_{K_{Annealing}}$ [%]
Aplicable a todos	$K_{annealing}(t) = -0,05963 \cdot \ln(t) + 0,4379$	10%

Tabla 8-7. Factor de corrección de la recuperación (*annealing*) de la potencia óptica del LED para aplicar en la torre de LED. Fue discutido en § 4.3.2.2.

Piso	$k_{Annealing}$	$\epsilon_{k_{Annealing}}$ [%]
Aplicable a todos	1	11%



Ahora se pasará a mostrar los factores de daño de los dos casos que se han mencionado: fluencia equivalente de energía umbral y fluencia equivalente de 80 MeV.

### A. Fluencia equivalente de energía umbral

Para expresar la fluencia en los llamados equivalentes umbrales, se sustituyen los factores de daño de la diagonal de la matriz de daño, en las ecuaciones 8-6 y 8-7.

En la Tabla 8-8 se han recopilado estos elementos de la diagonal de la matriz de la torre de oscuridad y en la Tabla 8-9 los de la torre de luz:

Tabla 8-8. Factor de daño de la torre de oscuridad producido por protones frontales. Datos correspondientes a la diagonal de la matriz de sensibilidad de la torre de oscuridad (Apéndice D)

Piso	$K_{DD}$	Energía de los protones equivalentes	$\mathcal{E}_{K_{DD}}$	
	[aA/cm <sup>2</sup> ]	[MeV]	[aA·s/cm <sup>2</sup> ]	[%]
Piso 1	8,7	10,67	0,18	2,2%
Piso 2	6,4	28,78	0,36	6,3%
Piso 3	6,23	40,90	0,098	1,8%
Piso 4	4,80	50,41	0,062	1,6%
Piso 5	3,77	58,74	0,062	2,1%
Piso 6	3,40	63,54	0,049	1,9%
Piso 7	2,89	70,67	0,038	1,8%
Piso 8	3,83	80,10	0,042	1,6%

Tabla 8-9. Factor de daño de la torre de luz producido por protones frontales. Datos correspondientes a la diagonal de la matriz de sensibilidad de la torre de luz (Apéndice D)

Piso	$K_{DD}$	Energía de los protones equivalentes	$\mathcal{E}_{K_{DD}}$	
	[aA/cm <sup>2</sup> ]	[MeV]	[aA/cm <sup>2</sup> ]	[%]
Piso 1	-395	10,67	28	7,74%
Piso 2	-82	28,78	18	24,6%
Piso 3	-100	40,90	5,8	6,8%
Piso 4	-86	50,41	8,9	13%
Piso 5	-199	58,74	9,1	5,8%
Piso 6	-19	63,54	10	70%
Piso 7	-14	70,67	5,1	49%
Piso 8	-104	80,10	6,6	9,1%

Puede verse que los elementos de la torre de luz tienen unas incertidumbres sustancialmente mayores. Los resultados que se obtengan con ellos no serán fiables. Los elementos de la torre de oscuridad son más precisos y al calcular con ellos la TNID, mostraran un mejor acuerdo con las simulaciones y con los monitores de referencia. Como se verá más adelante, funcionará mejor el cálculo de la TNID a partir de los factores de daño de los protones de 80 MeV.

### B. Fluencia equivalente de 80 MeV

Para expresar las fluencias en equivalentes de la misma energía se escoge la columna de los factores de daño de 80,10 MeV. Esos datos se han recopilado en la Tabla 8-10, para el caso de la torre de fotodiodos y en la Tabla 8-11, para el caso de la torre de LED. Estos factores se sustituyen en las ecuaciones 8-6 y 8-7 para calcular las TNID e incertidumbres expresadas en fluencias equivalentes de protones de 80,10 MeV.

Tabla 8-10. Factor de daño de la torre de oscuridad producido por protones frontales de 80,10 MeV. Valores correspondientes a la 8ª columna de la matriz de daño de la torre de oscuridad (Apéndice D)

Piso	$K_{DD}$	Energía de los protones equivalentes [MeV]	$\epsilon_{K_{DD}}$	
	[aA/cm <sup>-2</sup> ]		[aA/cm <sup>-2</sup> ]	[%]
Piso 1	3,32	80,10	0,077	2,5%
Piso 2	3,69		0,071	2,1%
Piso 3	4,10		0,071	2,0%
Piso 4	4,41		0,065	1,8%
Piso 5	3,85		0,059	1,9%
Piso 6	3,75		0,048	1,7%
Piso 7	3,76		0,043	1,6%
Piso 8	3,83		0,042	1,6%

Tabla 8-11. Factor de daño de la torre de luz producido por protones frontales de 80,10 MeV. Valores correspondientes a la 8ª columna de la matriz de daño de la torre de luz (Apéndice D)

Piso	$K_{DD}$ [aA/cm <sup>-2</sup> ]	Energía de los protones equivalentes [MeV]	$\epsilon_{K_{DD}}$ [aA/cm <sup>-2</sup> ]	$\epsilon_{K_{DD}}$ [%]
Piso 1	-107	80,10	7,2	7,2%
Piso 2	-834		4,2	5,5%
Piso 3	-103		5,3	5,9%
Piso 4	-141		7,5	6,4%
Piso 5	-165		7,1	5,4%
Piso 6	-978		5,4	7,1%
Piso 7	-70		5,6	11%
Piso 8	-104		6,6	9,1%

Nuevamente se comprueba que la torre de oscuridad da unos parámetros con incertidumbres relativas de valores inferiores.

### 8.2.2.2 Método indirecto: integración de los datos del flujo

El método indirecto se basa en la medida del flujo, esto es, el efecto transitorio que produce la ionización en los fotodiodos. Es un efecto completamente distinto al efecto acumulativo de los DD, usado en el método directo. Comparando los resultados obtenidos para cada uno de ellos, que deberían ser iguales, se da el primer paso en la comprobación del buen funcionamiento de LDT.

Para obtener la fluencia acumulada ( $\Phi$ ) por este método no hay más que aplicar [1-3] integrando el flujo en función del tiempo ( $\phi(t)$ ) entre el instante inicial ( $t_o$ ) y final ( $t_f$ ):

$$\Phi = \int_{t_o}^{t_f} \phi(t) dt \quad 8-8$$

Esta integral se transforma en un sumatorio cuando las medidas no son continuas en el tiempo

$$\Phi = \sum_{i=0}^{i=n} \phi_i \cdot \Delta t_i \quad 8-9$$

en donde:

- $\phi_i$  es cada una de las medidas individuales de ionización adquirida por LDT,
- $\Delta t_i$  es el intervalo temporal que hay entre dos medidas consecutivas.

En las ventanas de activación del modo automático nominal, este intervalo de tiempo es de 2 minutos. Para contabilizar la fluencia durante los periodos en los que no se mide, se distinguen tres situaciones:

- **Periodos largos** son aquellos que duran más de 24 horas. Inevitablemente se pierden los pases por la AAS de un día completo, lo que contribuye de manera significativa a la medida de la fluencia. Para evitarlo, se contabilizan suponiendo que las condiciones de radiación son las mismas que durante los días anteriores, y se supone que se acumula radiación exactamente al mismo ritmo medio diario.
- **Periodos cortos fuera de la AAS** son aquellos que duran menos de 24 h y no coinciden con pases por la AAS. Se considera que no suponen un aporte neto a la fluencia acumulada.
- **Periodos cortos dentro de la AAS** son aquellos que duran menos de 24 h pero sí coinciden con parte de la AAS. Se contabilizan calculando el porcentaje total de señal perdida de un día. Este porcentaje depende del área no sobrevolada y del valor del flujo de protones de esa zona perdida. No es lo mismo perder el área central de la AAS que un borde. Este efecto es una consecuencia directa del corrimiento al Este de las ventanas de activación (§7.2.1 y §7.3.2 (Fig. 7-34)).

Para obtener los parámetros de corrección de los periodos cortos dentro de la AAS, se parte de la secuencia de imágenes de la Fig. 8-3, en donde se representa la AAS mapeada por NANOSAT en distintos años. En cada imagen se ha calculado la integral de la señal del flujo respecto del área cubierta y se ha expresado el valor como un porcentaje

respecto de la integral que cubre el área completa de la AAS. Si NANOSAT cubre la AAS entera, el valor es el del 100% y no hace falta corregir. Pero, por ejemplo, los días del año 2014, como solo se ha cubierto un 60% de la señal de la AAS, el valor obtenido al integrar los datos de ese día es solo un 60% de la señal que se habría obtenido si se hubiera cubierto toda la superficie.

$$\Phi_{medida}(\text{año 2014}) = \Phi_{Total} \cdot 0,6$$

*Obtenida por l metodo indirecto integrando.*

8-10

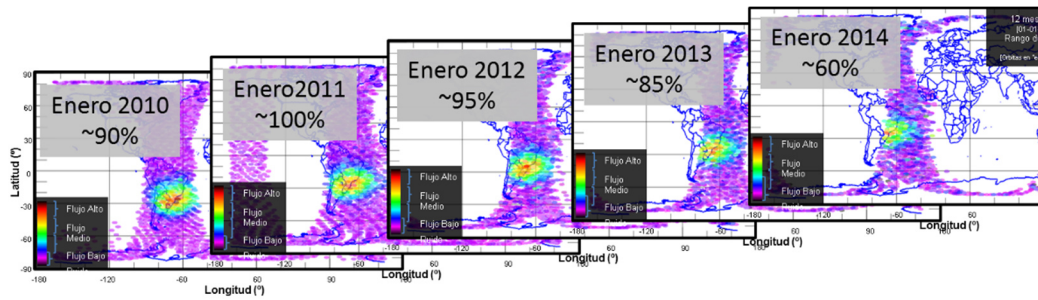


Fig. 8-3. Efecto del corrimiento al Este de las ventanas de activación sobre la determinación de la fluencia integrando el flujo de la AAS

Con los valores mostrados en la figura anterior (Fig. 8-3), se ha construido la función que corrige la determinación de la fluencia por medio de la integración del flujo. Para ello, se han representado en función del tiempo, y se han ajustado a una parábola (Fig. 8-4).

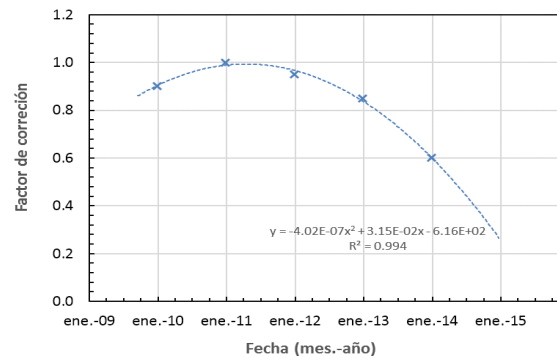


Fig. 8-4. Factor de corrección para la determinación de la fluencia a partir de la integración del flujo

En base a la ecuación obtenida en la Fig. 8-4, y teniendo en cuenta [8-9] y el ejemplo de [8-10] obtenemos la fluencia total ( $\Phi_{Total}$ ) de un día cualquiera medida a partir de los datos de ionización.

$$\Phi_{Total} = \frac{\sum_{i=0}^n \phi_i \cdot \Delta t_i}{-4,02 \cdot 10^{-7} d^2 + 3,15 \cdot 10^{-2} d - 6,16 \cdot 10^2}$$

8-11

en donde  $d$  expresa la fecha en el sistema de fechas de 1904 <sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Este sistema expresa una fecha como el número de días transcurridos desde el 01/01/1904

### 8.2.3 Detección de eventos solares

El método usado para la detección de cambios repentinos en el flujo del entorno orbital de NANOSAT está basado en la comparación del *Modelo Operativo Local de Protones atrapado de NANOSAT-1B* (MOLPN), con cada medida individual del flujo.

Cada medida obtenida es comparada con el valor predicho por MOPLN en esa región orbital. Si esta diferencia es mayor que el ruido, este punto se considera como un posible evento y es estudiado individualmente.

Para poder detectar con LDT un aumento en el flujo de los protones en órbita es necesario que este aumento se produzca en protones con una energía suficiente para atravesar la estructura del satélite, atravesar el apantallamiento de LDT y alcanzar el área sensible de los fotodiodos. Es decir, si solo aumentan los protones de poca energía la tormenta solar no podrá ser detectada por LDT. Es importante hacer esta aclaración porque durante una tormenta solar, el flujo espectral de protones no aumenta de la misma forma para todas las energías. Generalmente, es la población de protones de energías bajas la que más se incrementa durante una tormenta solar (Fig. 8-5).

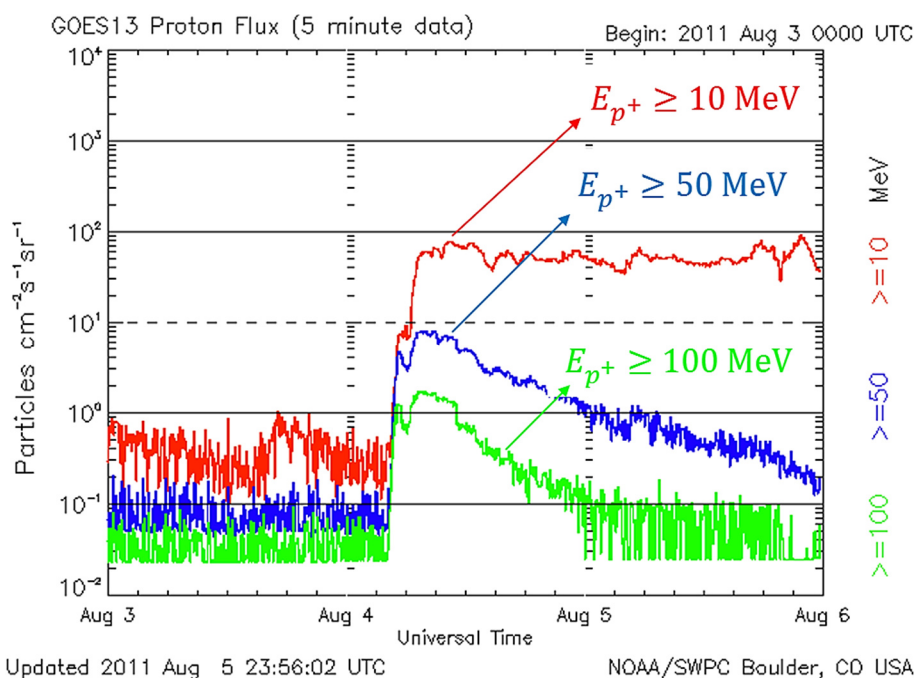


Fig. 8-5. Flujo de protones registrado por GOES-13 durante el evento del 04/08/2011 [GOES]

En la figura anterior (Fig. 8-5) se aprecia como el valor del flujo de los protones de energía superior a 10 MeV aumentan casi 3 órdenes de magnitud, y permanecen en ese estado durante más de dos días. Sin embargo, los  $p^+$  superiores a 100 MeV, solo aumentan 1 orden de magnitud, y vuelven a su estado de reposo en menos de 24 h.

Se han establecido tres umbrales para la energía de los protones en relación a la posibilidad de que LDT los detecte:

- Los protones de **energía**  $< \sim 35 \text{ MeV}$  no podrán ser detectados por LDT, pues no atraviesan la estructura de NANOSAT-1B.
- Los protones de **energía entre 40 y 120 MeV** serán detectados por uno o varios pisos de LDT, en función de la energía que tengan estos protones. Pero solo si inciden desde la parte frontal de LDT, pues el blindaje lateral de LDT los frenaría totalmente.
- Los protones de **energía**  $> \sim 125 \text{ MeV}$  afectaran a todos los pisos de LDT, desde cualquier dirección de incidencia.

Por lo tanto, si la tormenta no es suficientemente energética, LDT no la detectará.

Finalmente, reseñar la precisión de LDT en la medida del flujo es de unas decenas de  $\text{p}^+/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ . Este valor aumenta día a día, y a finales de 2014 alcanzaba ya los  $200 \text{ p}^+/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Para detectar una tormenta solar, esta debe de producir una fluctuación en el flujo de protones superior a la precisión del instrumento, en otro caso, quedará enmascarada por el ruido de la señal.

### 8.3 Resultados finales en órbita

A lo largo de esta sección se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de las señales que se han medido con LDT a lo largo de toda la explotación. Los resultados obtenidos se han comparado con la simulaciones realizadas y con datos de los RadFET de referencia a bordo del satélite (§7.2.2). El objetivo principal de la explotación de LDT es el de comprobar el funcionamiento del instrumento y verificar cuál de sus modos funciona mejor. Esto ayudará a optimizar el futuro desarrollo del monitor TTT en SEOSAT/INGENIO y a sentar las bases del uso del nuevo monitor miniaturizado de DD, basado en la medida de la corriente de oscuridad, aumentando su TRL hasta su máximo nivel. Este pequeño monitor ha sido adaptado para varias misiones de exploración en el planeta Marte: para la *Mars MetNet Precursor Mision* (§9.3.1), para la Misión Exomars 2016 (§9.3.2) y para el ROVER de Mars 2020 (§9.3.3) en actual desarrollo. En los tres casos, el monitor de DD va incluido en un Sensor de Irradiacion Solar multicanal (*Solar Irradiance Sensor – SIS*), desarrollado para estudios atmosféricos, y cuyo sistema óptico sufre ciertas degradaciones que pueden ser compensadas si se conocen la TNID recibida.

Esta sección se va a dividir en 4 apartados: en el primero se muestran las señales de corriente medidas por los fotodiodos (corregidas en temperatura) (§8.3.1); en el siguiente, los mapas de la AAS (§8.3.2); posteriormente se muestran los resultados de los DD (§8.3.3); por último, se presenta la detección de tormentas solares (§8.3.4).

### **8.3.1 Intensidad de corriente medida en los fotodiodos de LDT**

Los datos de LDT se han analizado desde enero de 2010, fecha en la cual las activaciones de prueba terminaron y se iniciaron las activaciones sistemáticas en la configuración que se ha denominado *nominal*. De hecho, la media de ese mes de enero se ha fijado como referencia a partir de la cual se calculan las variaciones de las señales.

En todos los casos se consideran los valores de las corrientes con la corrección térmica aplicada. Solo se han usado los datos medidos en la zona de la órbita en la que el satélite está en eclipse, pues proporciona dos ventajas: no entra luz en el satélite y se puede estudiar el piso 1, y se disminuye el tiempo de ejecución de los algoritmos de tratamiento. Además, los resultados que se obtienen con los datos en eclipse son prácticamente iguales que usando la órbita completa.

Para entender la evolución y el comportamiento de las señales de los pisos de LDT, se ha considerado útil dividir la exposición en dos partes, en la primera se mostrará la señal de un piso en función del tiempo (A), y en la segunda parte se compararán las señales de unos pisos con otros (B).

#### **A. Dependencia temporal**

Los primeros resultados y evolución de las señales de LDT se presentaron en [Jim10] sin haber alcanzado la optimización del tratamiento de la corrección térmica actual, por lo que los resultados obtenidos, en especial en el caso de la corriente de oscuridad, se vieron perturbados por su dependencia térmica. Bajo estas condiciones se encontró que la fotocorriente descendía a un ritmo de  $\sim 1700$  pA/semana (Fig. 8-6) y la corriente de oscuridad aumentaba a un ritmo de 5,5 pA/semana (Fig. 8-7).



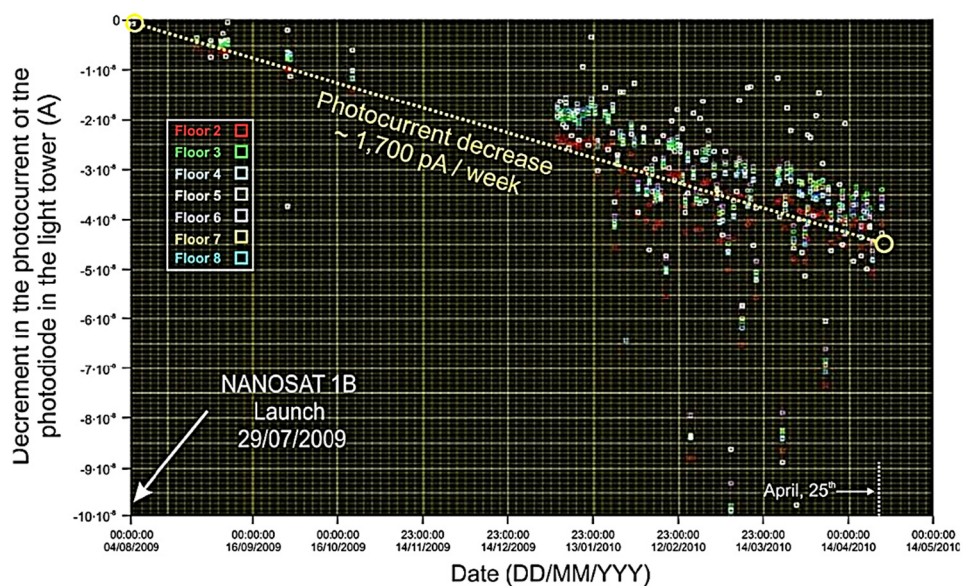


Fig. 8-6. Degradación de la potencia óptica emitida por el LED, en la torre de luz, medida por el fotodiodo [Jim10]

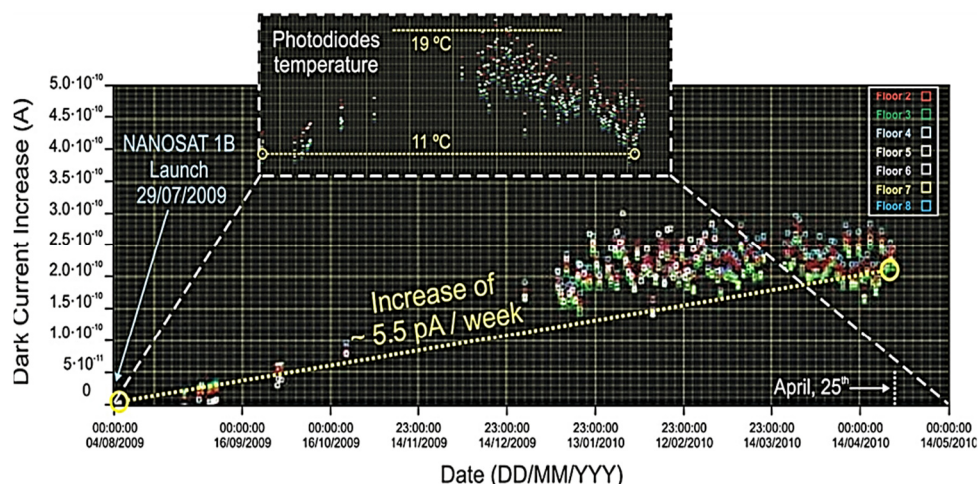


Fig. 8-7. Aumento de la corriente en oscuridad del fotodiodo de la torre de oscuridad [Jim10]

Para mostrar ahora las señales aplicando la corrección térmica, según se ha visto en §7.4.2, se ha seleccionado el piso 7, el cual está apantallado de forma más homogénea por todos lados, y tiene una energía media umbral de  $\sim 75$  MeV desde cualquier dirección (§6.2.2), esto hace que su comportamiento sea más homogéneo y los datos que proporciona tengan una interpretación más sencilla (similar a la de §2.1.2.2). Las señales de este piso, piso 7, se representan en la Fig. 8-8 en función del tiempo. En esta gráfica se incluye también el ajuste lineal que muestra la pendiente media de estas señales a lo largo de toda la explotación.

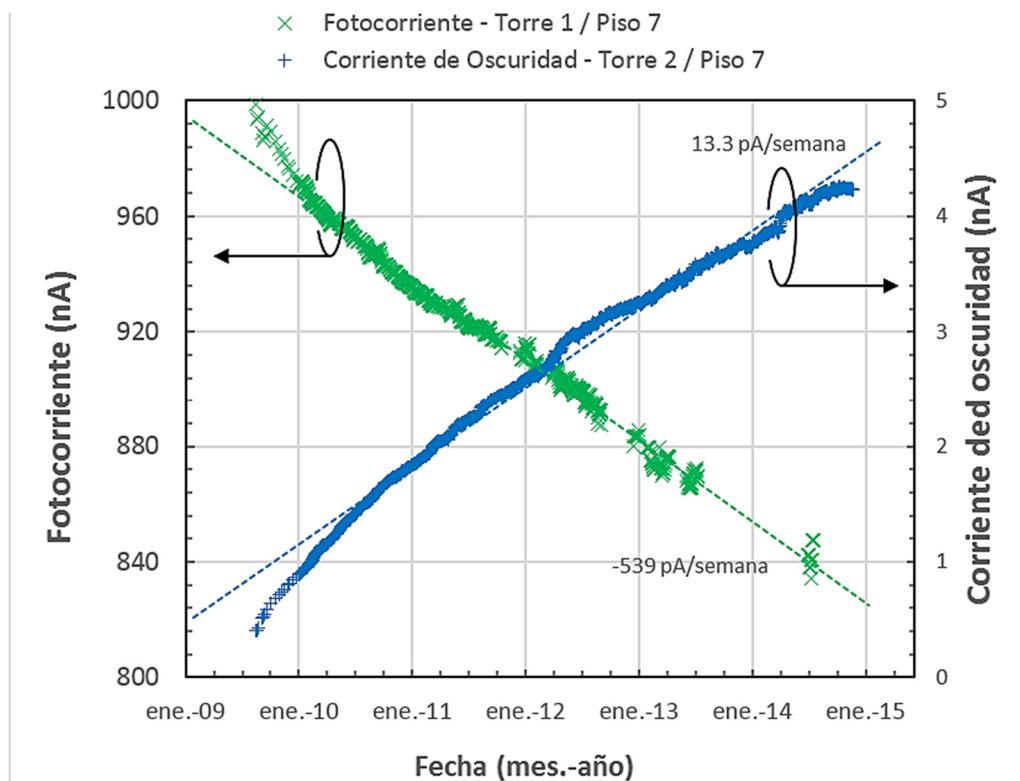


Fig. 8-8. Señal medida en el piso 7 de la torre de luz (verde) y de la torre de oscuridad (azul) durante la fase de explotación de LDT

Obviando el hecho de que las dependencias de ambas señales son de signo contrario y que el valor absoluto es también diferente, conviene resaltar algunas analogías y diferencias entre ambas curvas:

- **Analogías:** en ambos casos, al principio de la explotación, la pendiente es más pronunciada, lo cual puede deberse a que realmente el ritmo de acumulación de DD fuese más rápido.
- **Diferencias:** a pesar de que tras esos primeros meses de explotación ambas torres reducen el ritmo de degradación, en el caso del LED, parece que se ajusta mejor a una recta que en el caso de la corriente de oscuridad. Este segundo caso presenta una tendencia más acusada a ir reduciendo su pendiente poco a poco, lo que haría pensar que los DD cada vez se acumulan más despacio. La diferencia se explica por el efecto del *annealing*, que es mayor en el fotodiodo (i.e. corriente de oscuridad Tabla 8-6) que en el LED (i.e. luz emitida Tabla 8-7). Al aplicar la corrección de *annealing* sobre el fotodiodo, se verá que su respuesta se hace “más lineal” y más parecida, tanto a la del LED, como a la obtenida por las simulaciones de la TNID (§7.2.2).

En cuanto a las señales de ionización y los pases por la AAS mostramos en Fig. 8-9 una gráfica de los resultados publicados en [Jim10] que muestran datos del

piso 7 de la torre de oscuridad. En esta figura se representando el valor del pico más alto de un día completo. Los picos se producen al atravesar la AAS. Este valor máximo obtenido cada día, no corresponde siempre a un pase justo por el centro de la AAS, pues no todos los días hay una órbita que pase por esa latitud-longitud. Por este motivo existe una dispersión tan acusada en los valores analizados. También influye, comentando esta dispersión, el hecho de que la altura del satélite sobre la AAS varía de unos días a otros. El valor medio representado en esta grafica también corresponde con la media de todos los pases de un día, viéndose afectado por las mismas variaciones que el valor máximo. Esta gráfica incluye también, en el eje secundario, la correspondencia con el flujo de protones equivalentes de 10 MeV.

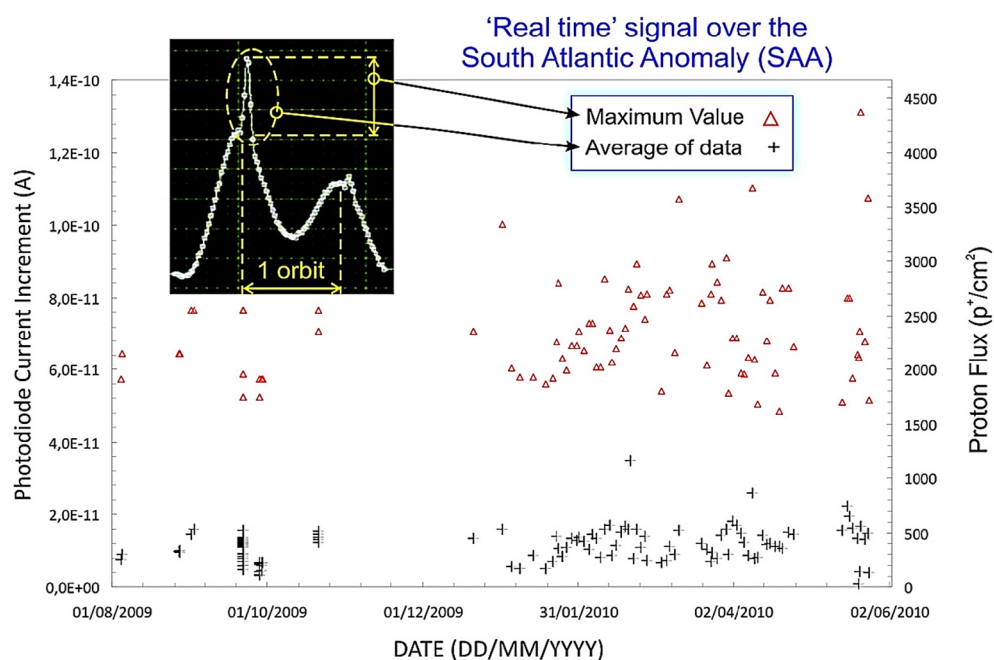


Fig. 8-9. Señal de ionización medida en el piso 7 de torre de oscuridad durante los primeros meses de explotación de LDT [Jim10]

## B. Comparación entre pisos

La Fig. 8-10 muestra la fotocorriente de todos los pisos de la torre de LED en diferentes fechas (izquierda) y la disminución absoluta de corriente desde enero de 2010 (derecha). En la Fig. 8-11 se muestran las mismas magnitudes pero referidas a las corrientes de oscuridad de la torre de fotodiodos. Las fechas de ambas figuras no coinciden ya que la torre de LED empezó a mostrar un comportamiento anómalo desde 2013.

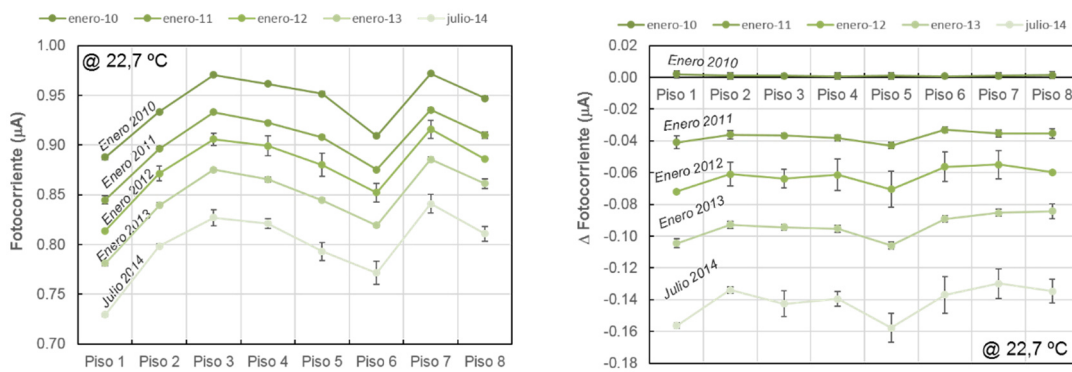


Fig. 8-10. Fotocorriente medida en la torre de LED en diferentes fechas (izquierda), y su disminución absoluta desde enero de 2010 (derecha)

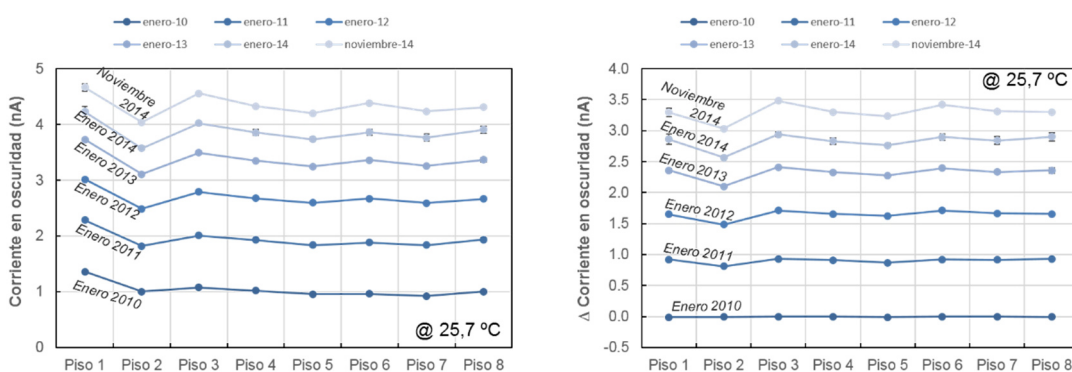


Fig. 8-11. Corriente en oscuridad de la torre de fotodiodos en diferentes fechas (izquierda), y su aumento absoluto desde enero de 2010 (derecha)

Cada punto de las gráficas anteriores es la media aritmética de todas las medidas adquiridas durante diez días. Para estimar la precisión de los datos representados, se ha calculado la dispersión de las medidas, es decir, la desviación estándar de la media, que es mayor que la precisión calculada por medio de la propagación de errores explicada en los apartados anteriores (ecuaciones 7-5, 7-7 y 8-5). En la Fig. 8-12 y en la Fig. 8-13 se representan las incertidumbres obtenidas por medio de ambos métodos, para cada torre.

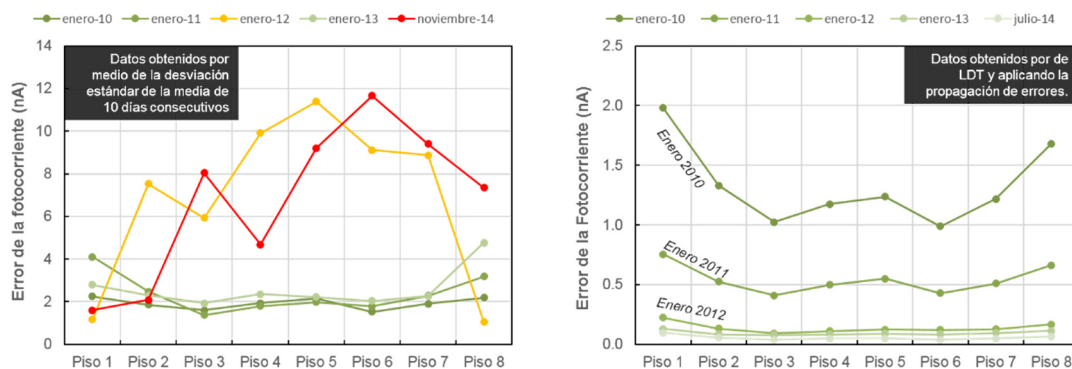


Fig. 8-12. Incertidumbre de la fotocorriente calculada por medio de la desviación estándar de la media de 10 días (izquierda) y calculado aplicando la propagación de errores a partir (derecha)



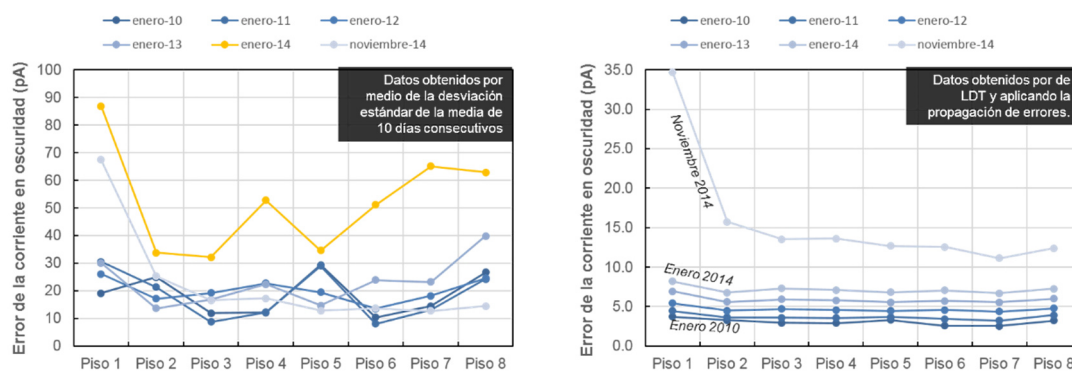


Fig. 8-13. Incertidumbre de la corriente en oscuridad calculada por medio de la desviación estándar de la media de 10 días (izquierda) y error obtenido por medio de los datos estadísticos que proporciona el instrumento (derecha)

Analizando la variación de señal que sufren los distintos pisos de ambas torres se obtienen los datos mostrados en la Tabla 8-12. Se incluye la variación estimada en la etapa de diseño de LDT, en base a la cual se especificaron los requisitos de rango dinámico y resolución de la electrónica. En esta misma tabla también se incluyen los datos de la resolución de la electrónica y los de la incertidumbre en el dato de la variación de las señales.

Tabla 8-12 Comparación de las características de las señales en órbita, el comportamiento predicho para el diseño, los requisitos científicos y las características conseguidas en laboratorio

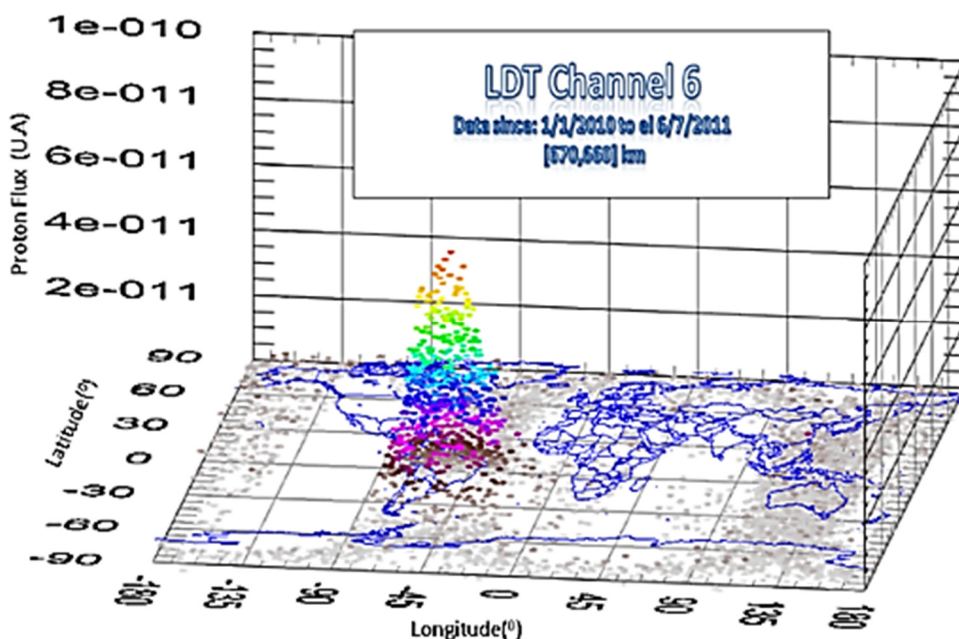
Torre	Datos en órbita		Predicción de las señales a medir <sup>1</sup>		Resolución conseguida <sup>2</sup>
	Variación media	Precisión	Variación media	Resolución necesaria	
	(Max / Min) [pA/Semana]	(Max / Min) [pA]	(Max / Min) [pA/Semana]	[pA]	
LUZ	-670 / -380	58 / 7	-5800 / -110	0,110	0,880
OSCURIDAD	18 / 9,8	0,4 / 0,04	62 / 12	0,012	0,001

*Datos obtenidos en la etapa de diseño (Capítulo 5)*

El valor de la precisión de la señal medida en órbita es tres órdenes de magnitud mayor (i.e. peor) que lo que se calculó que sería necesario para resolver el espectro de protones, en el caso de la torre de oscuridad, y cuatro órdenes de magnitud mayor, en el caso de la torre de luz (Tabla 5-4 y Tabla 5-5 de la §5.3.2). Por tanto, no se podrá reconstruir el espectro de protones del entorno de radiación. Pero, como se verá más adelante, se obtendrán los TNID de cada piso por independiente y los resultados obtenidos son compatibles con las simulaciones realizadas, y concuerdan con los datos de los RadFET.

### 8.3.2 Efectos de ionización – Mapas de la AAS

Tal y como se explicó en el §8.2.1, los datos de la corriente de ionización sirven para construir el mapa de la AAS. La Fig. 8-14 muestra una representación en 3D de la corriente de ionización medida por el piso 6, que como se sabe, es proporcional al flujo de protones.



*Nota: en eje-z se representa la intensidad de corriente, que es proporcional al flujo de protones, registrada en el canal 6*

Fig. 8-14. Corriente de ionización del piso 6 de LDT representada sobre un mapamundi [Jim12]

En la Fig. 8-15 se representan las medidas directas de flujo, a una altura de 635 km, expresadas en protones equivalentes de 10 MeV, de los 5 años de explotación. Cada mapa acumula los datos de un año y para cada periodo temporal se presenta dos vistas. Una de las vistas es como si se mirase la representación 3D de la Fig. 8-14 desde arriba, y la otra desde el Oeste.

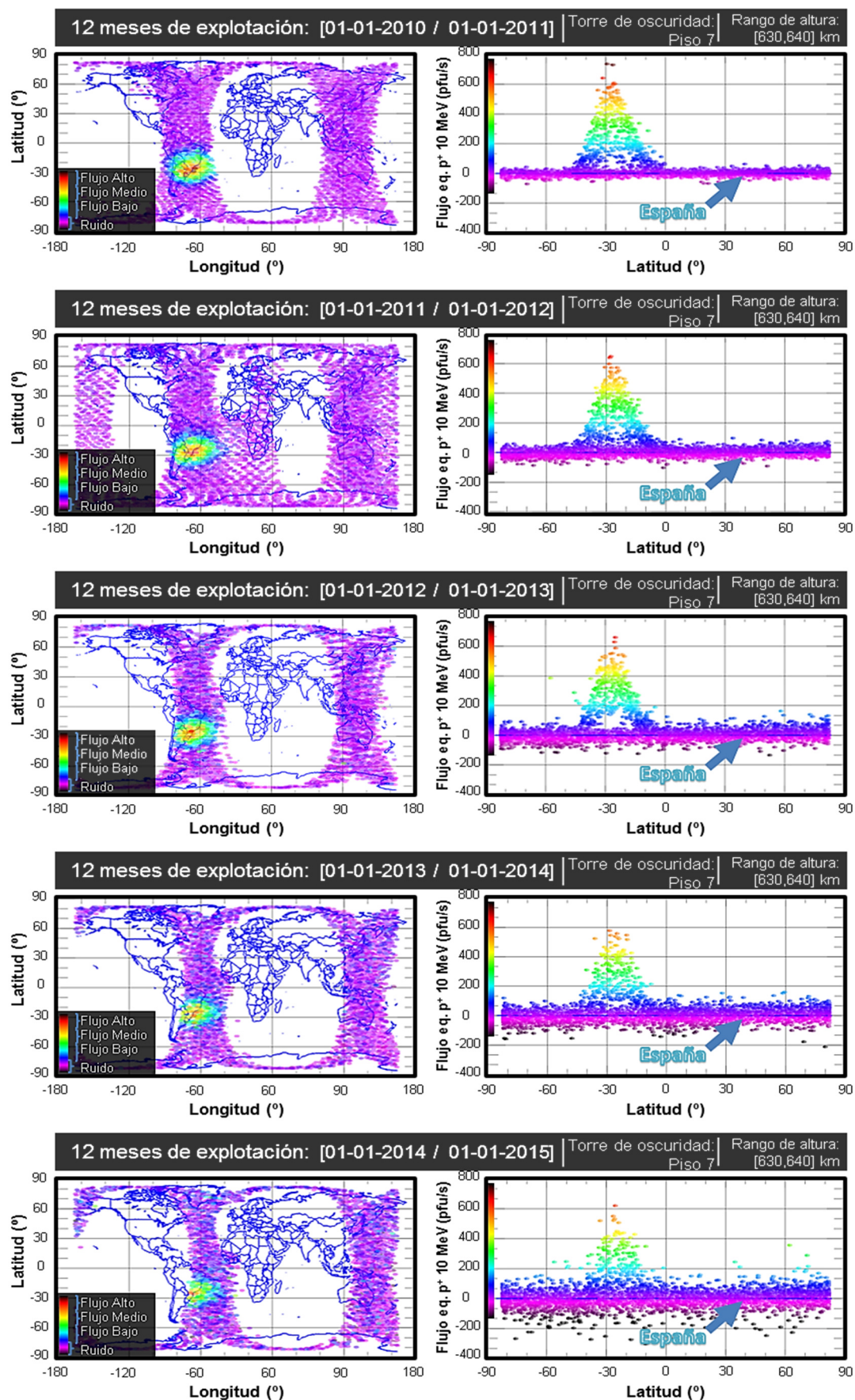


Fig. 8-15. Mapas de flujo de protones expresado en equivalentes de 10 MeV, medidos a través del piso 7, a una altura de entre 630 km y 640 km

Con los puntos experimentales mostrados en la figura anterior, se han construido los mapas que representan la AAS a diversas alturas. Se han representado estos mapas, junto a los obtenidos por algunos de los modelos de protones atrapados de uso común en la predicción del entorno de radiación, en torno a la Tierra (Fig. 8-16 a Fig. 8-20 extraídas de [Jim12]). Los datos mostrados en estos mapas representan el flujo a una altura de entre 670 km y 680 km. Los datos experimentales de LDT se representan por medio de curvas de nivel de color rojo, y los datos de los modelos de protones se representan usando una escala cromática. En todos los mapas se ha marcado, con ciertos símbolos, la posición del máximo flujo de todos los modelos contemplados. La Fig. 8-20 muestra la comparación con el modelo PSB97 cuyos datos son los que más se parecen al modelo experimental de la AAS desarrollado en este trabajo (MOLPN).

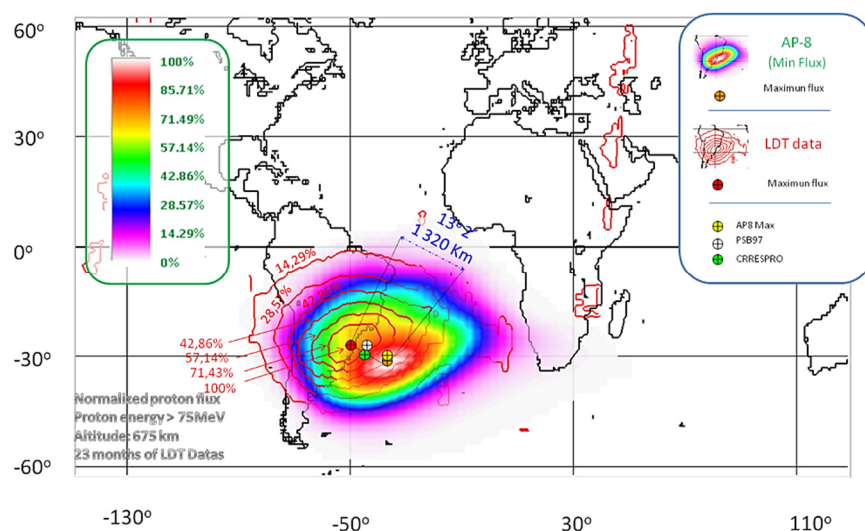


Fig. 8-16. AAS medida por LDT y simulada con el modelo AP-8 Min

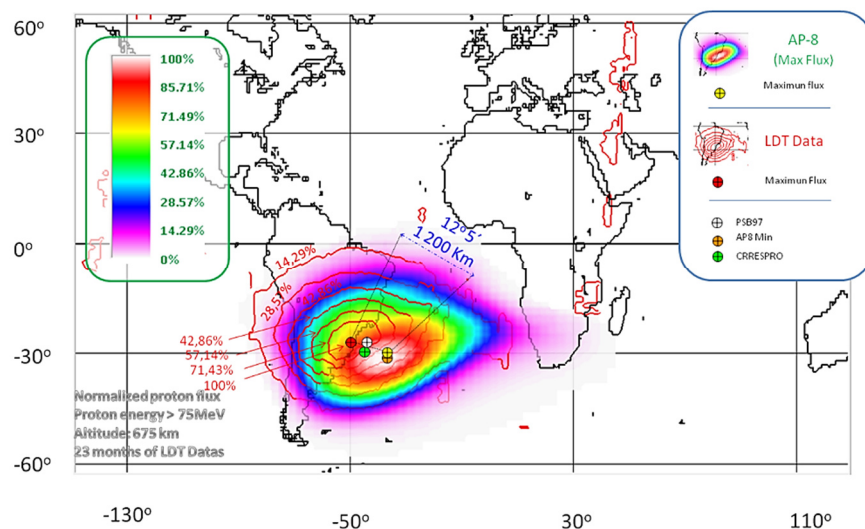


Fig. 8-17. AAS medida por LDT y simulada con el modelo AP-8 Max



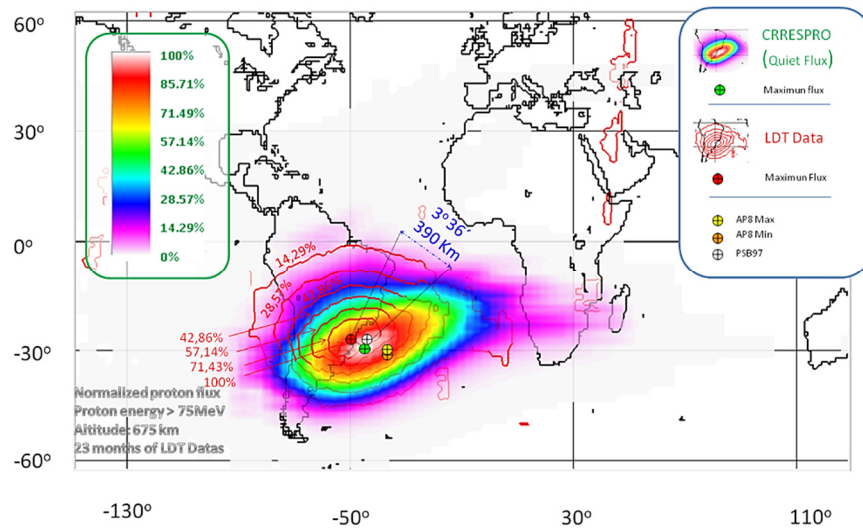


Fig. 8-18. AAS medida por LDT y simulada con el modelo CRRESPRO Quiet flux

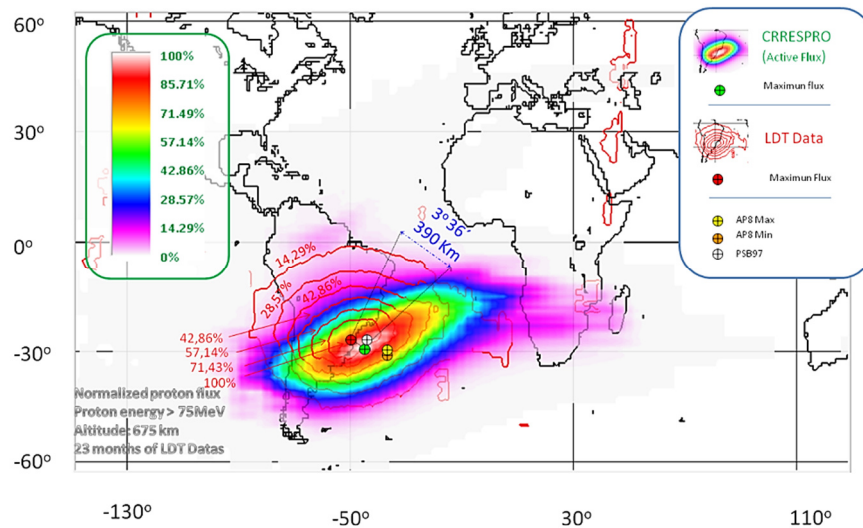


Fig. 8-19. AAS medida por LDT y simulada con el modelo CRRESPRO Active flux

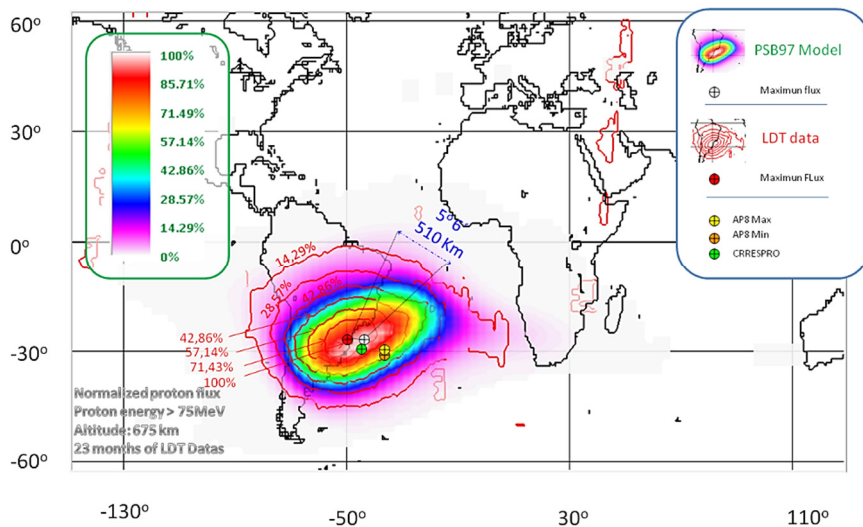


Fig. 8-20. AAS medida por LDT y simulada con el modelo de protones atrapados PSB97 que es el más parecido al MOLPN desarrollado en este trabajo

El máximo flujo de protones calculado con los modelos analizados y el obtenido con el modelo operativo de LDT, no coinciden exactamente en el mismo punto, llegando a estar separados hasta 13,2° (~ 1320 km lineales medidos sobre la superficie terrestre), pero es < 6° (~510 km) al compararlo con el PSB97 . Esta diferencia en la posición del máximo, que en realidad no es tan grande, es similar en todas las alturas de la órbita de NANOSAT (Fig. 8-21). En [Jim12] también se comparó el valor del flujo máximo encontrado en cada uno de los modelos y en LDT. Este valor máximo se ha representado en la Fig. 8-22 expresado en protones equivalentes de 75 MeV. Analizando esta grafica, se comprueba que los modelos PSB97 y AP8-Max Flux son los que dan valores de flujo más parecidos a los datos de LDT.

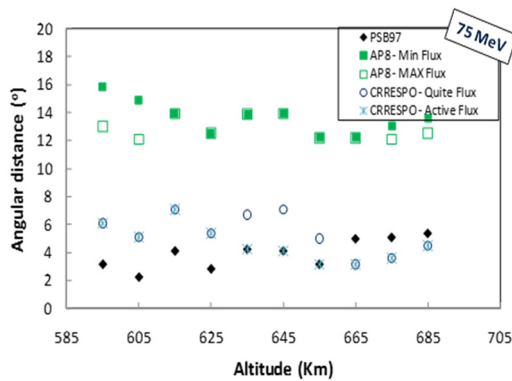


Fig. 8-21. Distancia del máximo de la AAS obtenida por el LDT y otros modelos [Jim12]

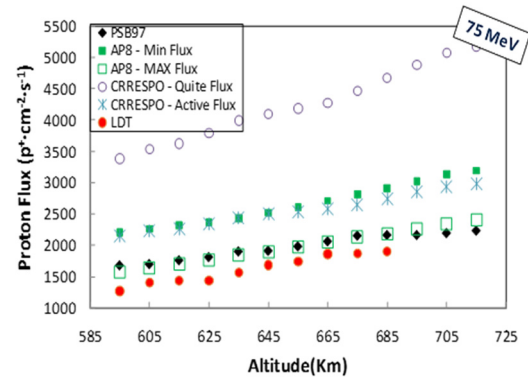


Fig. 8-22. Flujo de protones obtenidos por el LDT y otros modelos [Jim12]

La Fig. 8-23 muestra una tabla que compara el grado de acuerdo entre los datos de las medidas de la AAS de este trabajo y los modelos de protones atrapados analizados. En dicha tabla se establecen 3 categorías de comparación: la forma de la AAS,

Model	Shape	Position	Value
AP8-Min	✓	X	X
AP8-Max	✓	X	✓
CRRESPRO-Quite	X	✓	X
CRRESPRO-Active	X	✓	X
PSB97	✓	✓	✓
✓ = Satisfactory comparison			
X = Non satisfactory comparison			

Fig. 8-23. Resultado de la comparación entre algunos modelos de protones atrapados y el MOLPN [ Jim12]

la posición del centro y el valor del máximo. Y se establece si la comparación entre LDT y el modelo en cuestión ha sido satisfactoria o no. Puede verse que el modelo que mejor coincide es el PSB97, pues simula valores similares a los medidos por LDT, su forma es muy parecida, y la posición del centro de la AAS es la misma, dentro de los límites de precisión de la geolocalización de los valores medidos de LDT, que es de ± 2°. No es de

extrañar que sea al PSB97 el modelo que mejor concuerda con los datos de LDT, pues es un modelo específico para órbitas LEO [PSB97] (§1.1.2) como la de NANOSAT.

Esta comparación muestra algo ya conocido: hay gran discrepancia entre modelos bien establecidos en la comunidad científica, especialmente en las órbitas LEO. Y deja de manifiesto la necesidad de seguir trabajando en el desarrollo, mejora y unificación de los distintos modelos de radiación, para llegar a conseguir uno que sea general y válido para todas las épocas y tipos de órbita.

### 8.3.3 Efectos de DD – TNID

A partir de la variación de la señal de intensidad de corriente de LDT se obtiene la TNID expresada como fluencia equivalente de protones de 10 MeV. Para ello se usan los métodos y expresiones detalladas en la §8.2.1.2.

Se va a dividir este apartado en dos partes para seguir la misma estructura que en el apartado §8.3.1, en el que se mostraron por separado la señal del piso 7, en función del tiempo y después se compararon las señales entre los diferentes pisos de LDT. En esta ocasión, además se compararán los resultados con las simulaciones mostradas en §7.2.2.

#### 8.3.3.1 Dependencia temporal

Los resultados obtenidos con el piso 7 se comparan con las simulaciones que fueron mostradas en la Fig. 7-22. Para ello, se muestran en la Fig. 8-24 los datos de las simulaciones y el TNID obtenido con el piso 7, por medio de los tres procedimientos explicados durante el análisis de datos (§8.2.2):

- Método directo usando la degradación del LED<sup>28</sup> (torre de luz).
- Método directo usando la degradación del fotodiodo<sup>29</sup> (torre de fotodiodos).
- Método indirecto integrando la señal de ionización (torre de fotodiodos).

---

<sup>28</sup> Se recuerda que la degradación del LED que aquí se estudia es el decaimiento de su potencia óptica de emisión.

<sup>29</sup> Se recuerda que la degradación del fotodiodo que aquí se estudia es el aumento de la corriente de oscuridad.

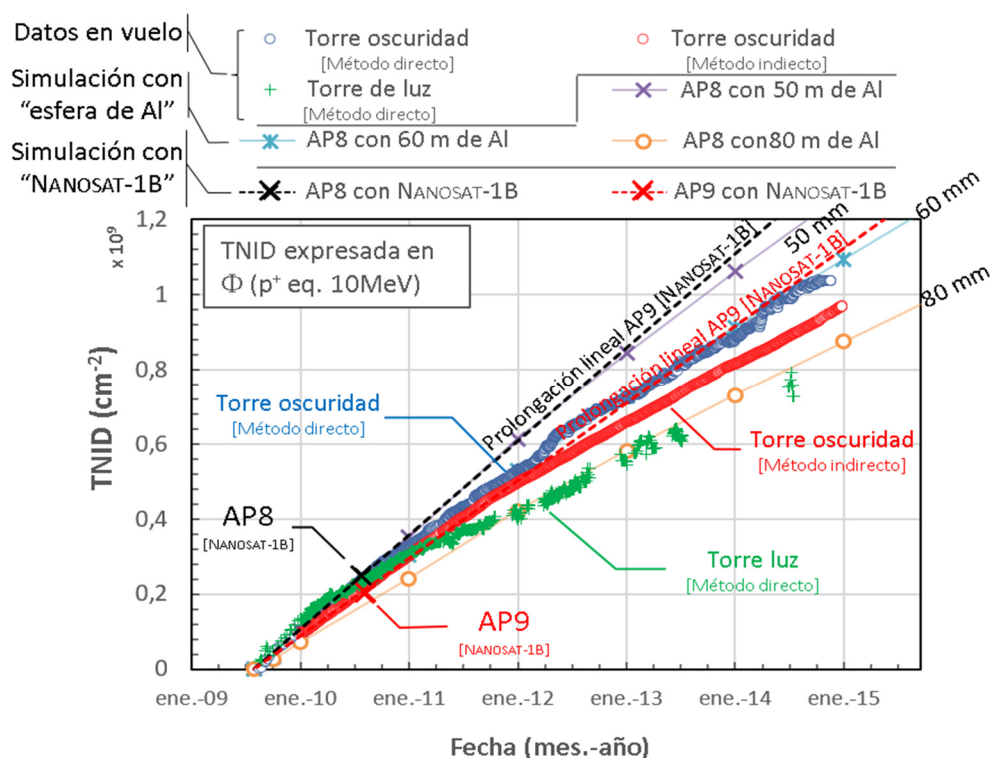


Fig. 8-24. TNID obtenido mediante las simulaciones con el modelo 3D de NANOSAT-1B, la simulación con esferas homogéneas de distintos espesores, y los datos obtenidos por el piso 7 de LDT, usando los métodos directos (con la torre de luz y la torre de oscuridad) y el método indirecto (integrando la señal de ionización de la torre de oscuridad)

Los datos de la corriente de oscuridad de la torre de fotodiodos se comporta como la simulación correspondiente a una esfera de entre 50 y 70 mm. Esto supone entre 10 y 30 mm más que en el caso de los RadFET mostrados en la Fig. 7-19. Este resultado es compatible con los 25 mm de apantallamiento adicional que tienen LDT respecto a los RadFET, y también coincide con la simulación realizada usando la estructura 3D de NANOSAT.

Los datos obtenidos por el método indirecto, integrando la señal de ionización, son también compatibles con todo lo establecido anteriormente. Sin embargo, en el caso del LED, se observa un efecto que es consecuencia directa de la aceleración que sufre su ritmo de recuperación (*annealing*), con la intensidad de corriente de alimentación. Se sabe que estos cambios de tendencia están provocados por el *annealing* inducido por la alimentación de los LED, ya que están ligados a los modos de activación de LDT:

- Durante las **activaciones en modo manual**, la fluencia medida por los LED parece aumentar más rápidamente que la medida por el fotodiodo. En esta época (2009), las activaciones fueron esporádicas, por lo que los LED estuvieron la mayor parte del tiempo apagados y el efecto del *annealing* resultaba despreciable.

- Durante las **activaciones nominales** la fluencia medida por ambos dispositivos es similar. Esto sucede en dos periodos de tiempo: durante 2010, y a partir de 2012.
- Durante las **activaciones extendidas** la degradación de los LED es inferior a la de los fotodiodos. Esto sucede durante parte del año 2011. En esta época se media de forma ininterrumpida durante las 24 horas del día. Esto provocaba que los LED estuvieran encendidos durante más tiempo que en las activaciones nominales. Por ello, el efecto del *annealing* es mayor y el TNID parece aumentar más lentamente.

En la Fig. 8-25 se ha representado el ritmo medio de crecimiento de la TNID (o flujo medio equivalente) a partir de los datos de la Fig. 8-24. En esta figura se observa como la línea verde, correspondiente a los datos de la torre de luz, representa un flujo superior al detectado por los fotodiodos hasta enero de 2010, fecha en la que decae por el efecto antes mencionado. Posteriormente, vuelve a reducirse como consecuencia del *annealing* extra del periodo de activaciones extendidas. El flujo medio mostrado en esta figura se expresa en  $\text{cm}^2/\text{día}$ , y corresponde al flujo medio observado durante 200 días: los 100 días anteriores y posteriores a la fecha representada. El valor del flujo correspondiente a fechas anteriores a enero de 2010, está calculado, con menos de 200 días, pues hasta esa fecha no había habido tantas activaciones.

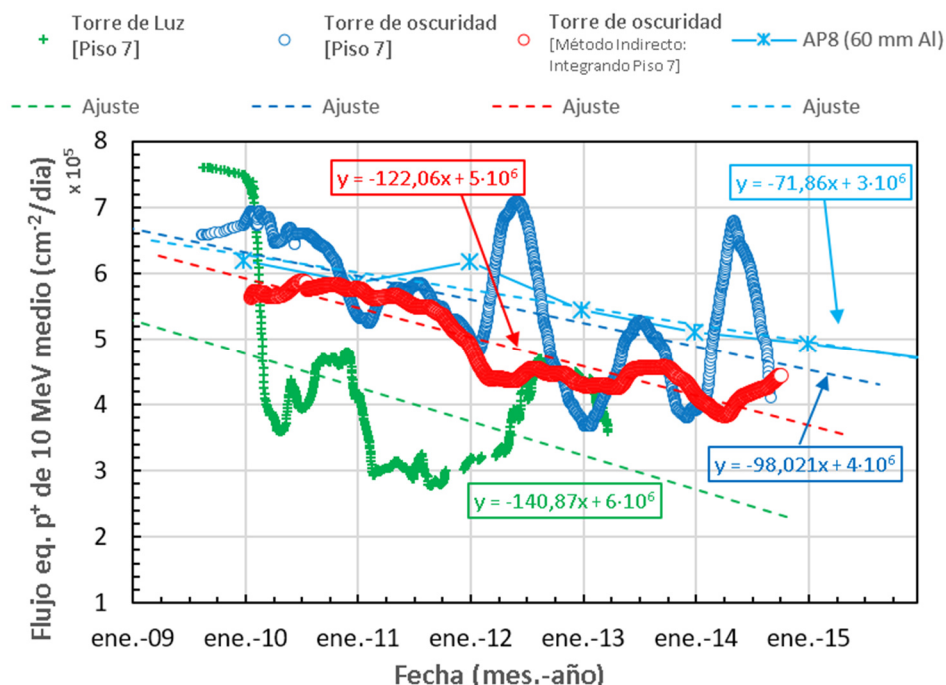


Fig. 8-25. Flujo equivalente medio (de protones de 10 MeV) obtenido por LDT y calculado con la simulación del caso de la esfera de 60 mm de aluminio.

Al igual que en el caso de los RadFET, el flujo medido por LDT desciende más rápidamente que los datos de la simulación.

En la gráfica también puede observarse una tendencia armónica, de periodo 1 año, en la señal de la torre de oscuridad. Esta tendencia ya había sido observada en el caso de los RadFET (Fig. 7-20), y está relacionada con cambios en la temperatura del satélite. La Fig. 8-26 muestra la temperatura media de NANOSAT, en donde se aprecia el mismo patrón de variación, sustentando la hipótesis planteada.

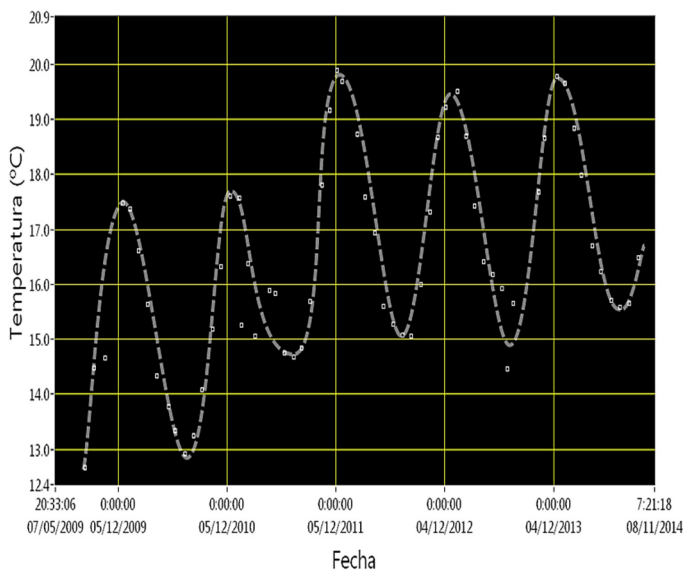


Fig. 8-26. Temperatura media medida por un piso de LDT a lo largo de toda la explotación. Se observa una variación armónica de un año de periodo

Para comparar la respuesta de los RadFET y la de la torre de fotodiodos, se han representado en la Fig. 8-27 ambas señales. Como los datos representan magnitudes distintas, aunque proporcionales, se han utilizado dos escalas, una en el eje izquierdo (referente a la tasa de dosis de los RadFET) y otra en el derecho (referente al flujo equivalente de LDT).

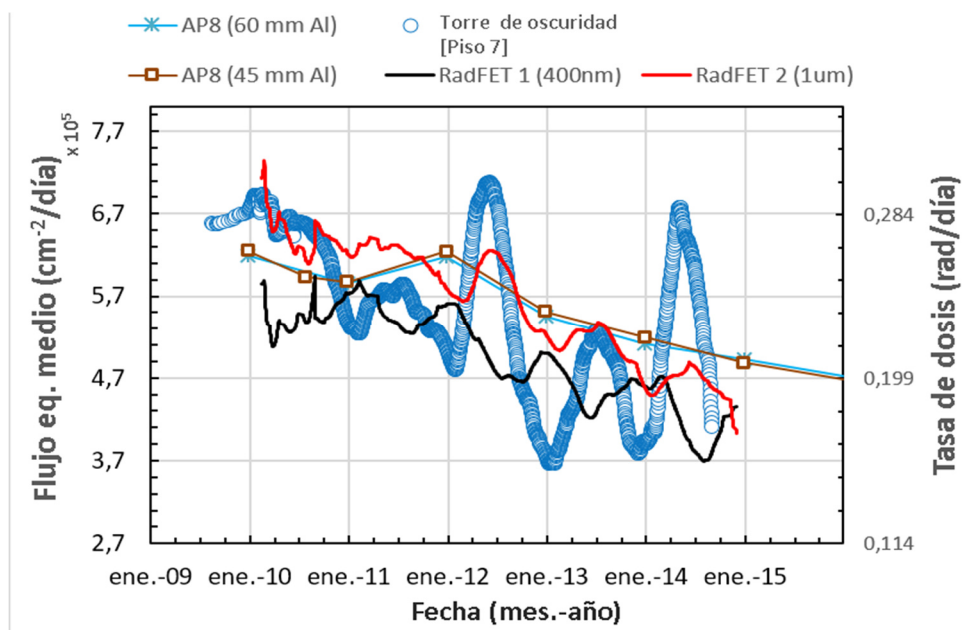


Fig. 8-27. Tasa de TID y tasa de TNID de LDT, RadFET y simulaciones. Se observa la tendencia sinusoidal de periodo anual

Se ve que, tanto los datos de la corriente de oscuridad, como los del RadFET 2 están en fase, mientras que el RadFET 1 está desfasado medio año. Esto es así, a pesar de haber implementado las correcciones térmicas, porque las señales siguen teniendo una cierta dependencia térmica. El resultado obtenido no debe interpretarse como un mal funcionamiento de las correcciones térmicas no funcionen, al contrario, demuestran que LDT obtiene resultados comparables a los obtenidos con los RadFet, que son un dispositivo diseñado para este tipo de aplicaciones. La dependencia térmica que muestran los RadFET, que es intrínseca a su tecnología, es también ‘residual’, pues fue compensada por hardware con un diseño electrónico, que el propio fabricante recomendó para esta aplicación.

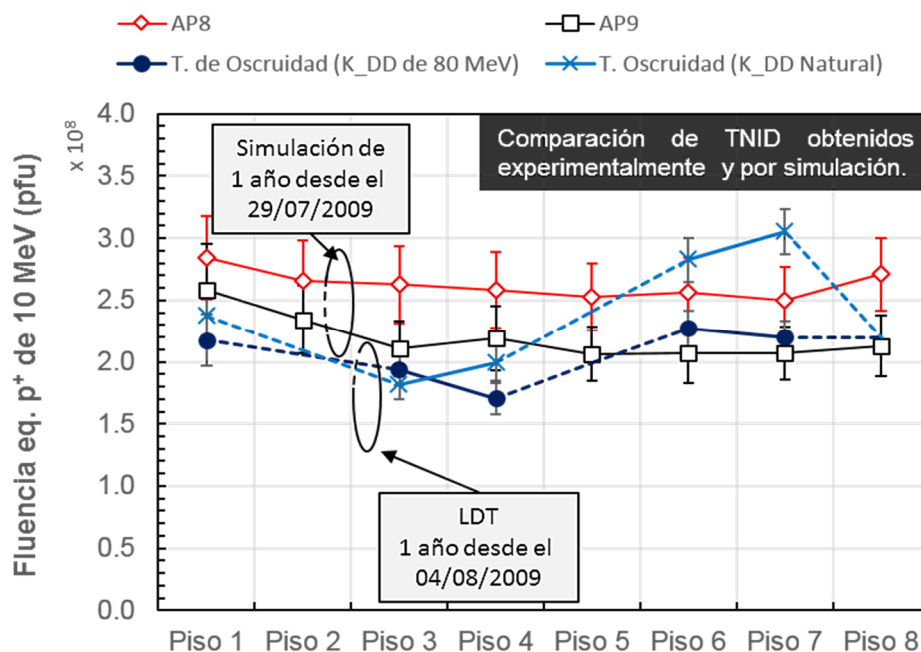
Con esta comparación demostramos que las medidas de LDT son de una calidad similar a los RadFET de NANOSTA-1B, pero para medir la dosis de daño por desplazamiento (TNID), en vez de la de ionización (TID). Alcanzar un nivel de madurez y unas prestaciones cercanas al del RadFET constituye un gran logro, y es uno de los motivos por los que este monitor de TNID ha sido incluido, como referencia de TNID, en todas las misiones de exploración del planeta Marte en las que el INTA ha y está desarrollando instrumentación de base optoelectrónica (§9.3).

#### **8.3.3.2 Comparativa entre pisos**

Para comprobar que la degradación sufrida en los diferentes pisos de LDT es como se esperaba, se dispone de la simulación realizada con la estructura 3D simplificada de NANOSAT. Los resultados fueron mostrados en la Fig. 7-21, en la que se vio que la diferencia en la degradación esperada entre diferentes pisos es inferior al 20%. Esta diferencia es del mismo orden que el error estadístico asociado a la simulación.

La comparación de las simulaciones con LDT no puede hacerse para todos los modos de medida, ni con todos los pisos. La simulación se realizó solo con los datos orbitales del inicio de la misión, y como la órbita del satélite pierde altura año tras año, los resultados son válidos únicamente para el primer año de explotación. En este periodo, el satélite estuvo en pruebas casi durante 5 meses y no estaban permitidas las activaciones nominales necesarias para aprovechar los datos de la ionización directa. Además, la referencia de señal tomada el día 4 de agosto de 2009 (pocos días después del lanzamiento) no fue válida para el piso 2 y el piso 5, de la torre 2, ni para la torre 1. Por este motivo en la Fig. 8-28 no se muestran estos datos.





*Nota: la fecha de inicio de los datos simulados y los experimentales no es la misma. La simulación está calculada desde el día del lanzamiento, y las medidas experimentales desde la primera medida completa realizada (aunque los datos del piso 2 y del piso 5 se perdieron durante esta adquisición).*

Fig. 8-28. Comparación de la fluencia equivalente de protones frontales de 10 MeV entre la torre de oscuridad y la simulación realizada con el modelo 3D del satélite para el primer año de explotación

La degradación de todos los pisos, dentro de los márgenes de incertidumbre, coincide con las simulaciones. Es decir, la sobreestimación de la simulación por no contemplar toda la masa del satélite desaparece, confirmándose la hipótesis de que, en el caso de LDT, esta sobreestimación se reduciría.

Una vez verificado el buen funcionamiento de los datos de la torre de oscuridad, el resto de modos de medida puede compararse con la torre de oscuridad en otras épocas donde la simulación ya no es válida. En la Fig. 8-29 se representa la TNID acumulada tras 1 año y tras 5 años, conablidados desde enero de 2010. La torre de luz, no se muestra en los datos de 5 años pues, como se vio en la Fig. 8-24, dejó de funcionar a partir de mediados de 2013. Esta figura muestra que los datos obtenidos a partir de los factores de daño de 80 MeV se comportan homogéneamente y de igual forma que las simulaciones. Sin embargo, los equivalentes de energía umbral se salen de lo esperado mostrando incertidumbres mayores y tendencias más caóticas.



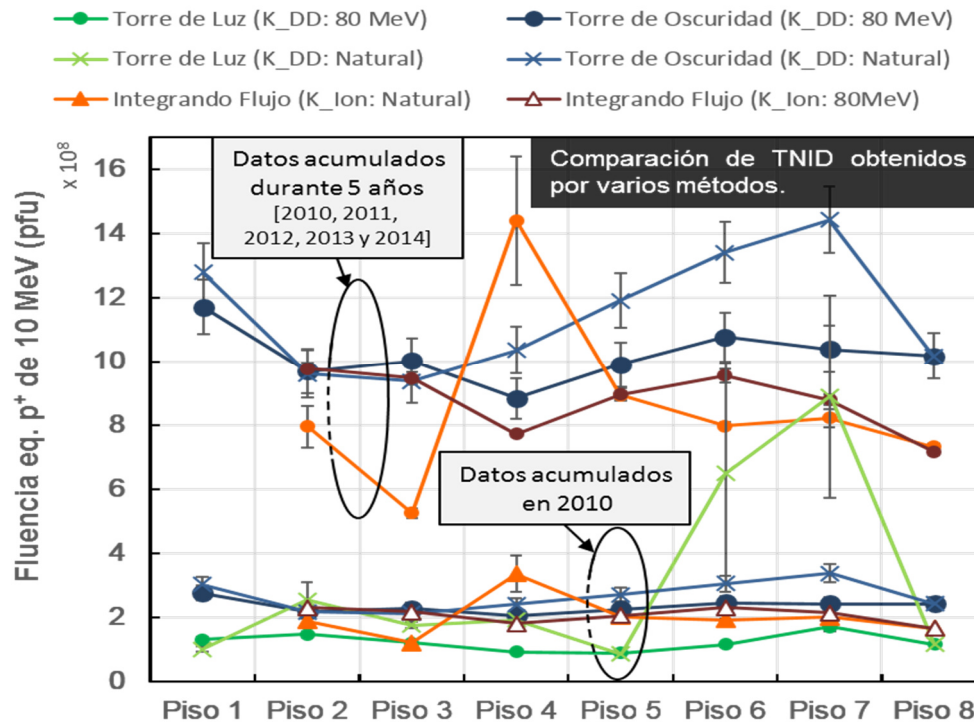


Fig. 8-29. TNID acumulada en 1 año y en 5, para los diferentes modos de funcionamiento de LDT.

En base a estos resultados, se consideran más precisos, los datos obtenidos con los factores de daño de los protones de 80,10 MeV. Esto es lógico si se tiene en cuenta que al irradiar con la energía umbral del piso, este es muy sensible a pequeñas variaciones de la energía de esos protones. Por lo tanto, si la energía de los protones con los que se irradia es un poco mayor o un poco menor, el efecto en los factores de daño es acusado, y repercute directamente en los resultados en órbita. Por esta misma razón, la anchura espectral del haz de protones de irradiación también tiene un efecto mayor al irradiar con la energía umbral.

### 8.3.4 Detección de eventos solares

LDT no ha detectado ningún evento solar. Existen dos motivos que los justifican:

- La órbita de NANOSAT es una órbita LEO y por ello muy protegida de la radiación.
- Los eventos solares que se han producido y han llegado a afectar al entorno terrestre han sido poco intensos. Los datos proporcionados por los monitores de protones embarcados en algunos satélites de la constelación GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) [GOES] que serán mostrados más adelante, lo demuestran.

Cabe mencionar que hubo un falso positivo. Se explicara cual fue el motivo de este error, para que pueda ser tenido en cuenta en la explotación futura de LDT.

#### **8.3.4.1 Comparación con los monitores de GOES – datos de SWPC de la NOAA**

Los satélites GOES son una constelación de satélites geoestacionarios (órbita GEO), estadounidenses, para la realización de estudios meteorológicos y ambientales. Esta constelación perteneciente al “Servicio Nacional de Meteorología” (*NWS – National Weather Service*), está gestionado por la “Administración Nacional Oceánica y Atmosférica” (*NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration*). Además del estudio de la meteorología terrestre, también estudia la meteorología espacial. Por este motivo, algunos de estos satélites registran el flujo de protones en diferentes bandas energéticas, en la órbita geoestacionaria, datos que nos servirán como una primera referencia de los niveles de flujo alrededor de la Tierra.

Una órbita GEO (~ 36.000 km) es más alta y está más expuesta a la radiación que la de NANOSAT (~ 650 km). Además, cuenta con una menor protección del campo magnético terrestre, que las órbitas LEO y, por ello, se encuentran en una mejor situación para monitorizar el entorno de radiación y la actividad solar. Sin embargo, precisamente por estar más desprotegidas que LDT, sus datos no son comparables. Debido a que la radiación que llega a LDT es sustancialmente inferior, el efecto medido por los GOES tendría que ser realmente grande para que pudiera llegar de forma apreciable a la órbita de NANOSAT. Para lo que sí que sirven estos datos es, en primer lugar para detectar que se ha producido un evento y, en segundo lugar, para identificar la intensidad del evento y determinar si hay opción de que pudiera alcanzar a LDT.

En la Tabla 8-13 se han incluido los 5 eventos más intensos registrados desde 1976 (en donde el primero reseñable no sucedido hasta 1989). También se incluyen, todos los que se han producido desde el lanzamiento de NANOSAT. Así mismo, se indica si en el momento de dicho evento LDT estaba activa o inactiva.

Tabla 8-13. Registro de eventos solares que han afectado al entrono terrestre obtenidos por sensores a bordo de la constelación de satélites GOES en órbita GEO.

Año	Máximo	Flujo de p <sup>+</sup> [pfu] (> 10 MeV)	Estado de LDT	Año	Máximo	Flujo de p <sup>+</sup> pfu (> 10 MeV)	Estado de LDT
1989	Oct-20 16:00	40 000	N.A		27-May 10:45	14	Activo
1991	Mar-24 3:50	43 000	N.A		16-Jun 20:20	14	Activo
2000	Jul-15 12:30	24 000	N.A		07-Jul 07:45	25	Activo
2001	Nov-06 2:15	31 700	N.A		12-Jul 22:25	96	Activo
2003	Oct-29 6:15	29 500	N.A		18-Jul 06:00	136	Activo
2009	Ninguno	Lanzamiento de NANOSAT-1B 29/07/2009			23-Jul 21:45	12	Activo
2010	Aug-14 12:45	14	Activa		02-Sep 08:59	59	Activo
	Mar-08 8:00	50	Activa		28-Sep 04:45	28	Activo
	Mar-22 1:35	14	Activa		17-Mar 07:00	16	Activo
2011	Jun-07 18:20	72	Activa		11-Abr 16:45	114	Activo
	Aug-05 21:50	96	Inactiva		17-May 17:20	41	Activo
	09-Ago 12:10	26	Activa		23-May 06:50	1 660	Activo
	26-Sep 11:55	35	Inactiva		24-Jun 05:20	14	Activo
	27-Nov 01:25	80	Activa		30-Sep 20:05	182	Activo
2012	24-Ene 15:30	6 310	Activa		28-Dic 23:15	29	Activo
	28-Ene 02:05	796	Activa		06-Ene 16:00	42	Activo
	8-Mar 11:15	6 530	Activa		09-Ene 03:40	1 033	Activo
	13-Mar 20:45	469	Inactiva		20-Feb 09:25	22	Activo
	17-May 04:30	255	Activo		28-Feb 08:45	103	Activo

La mayoría de los eventos que han sucedido desde el lanzamiento son totalmente indetectables por LDT. Para confirmarlo se han comprobado los niveles de flujo de todos los eventos sucedidos durante la explotación de LDT, usando las gráficas temporales de los datos de los monitores de protones de GOES, que la NOAA publica en su página web [SWPC\_NOAA], [NOAA\_P].

Como ejemplo de un evento de intensidad media/baja se muestra el de agosto de 2011 en las Fig. 8-30 y Fig. 8-31. Se ve que los flujos de protones son de por sí muy bajos, incluso en la órbita GEO de GOES, por lo que queda totalmente descartado que pudieran haber superado el umbral de detección de LDT.

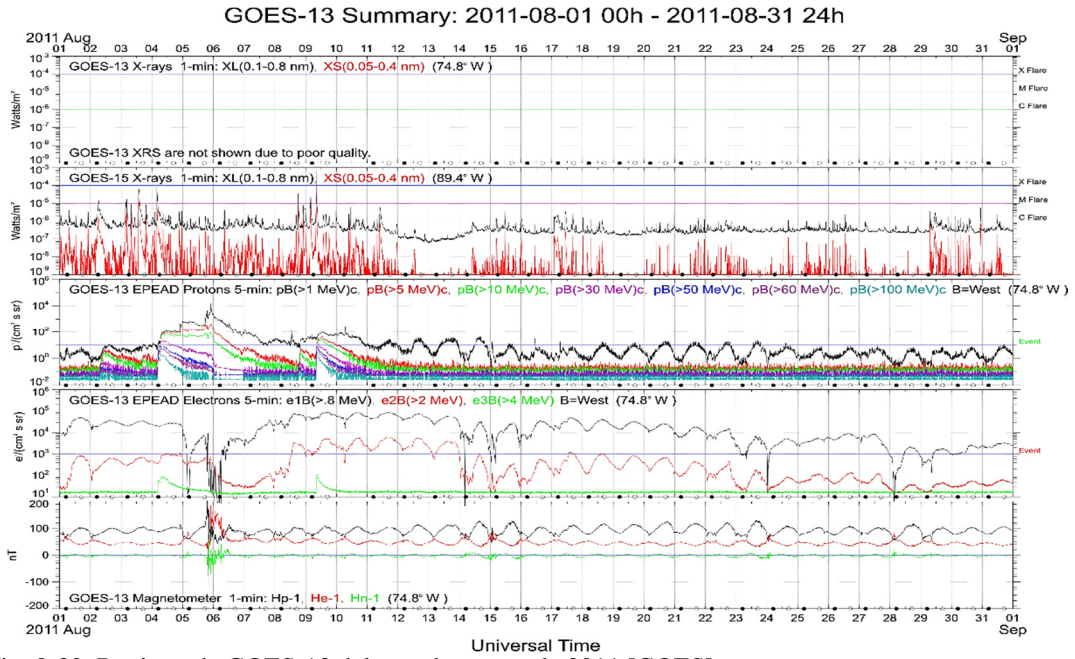


Fig. 8-30. Registro de GOES-13 del mes de agosto de 2011 [GOES]

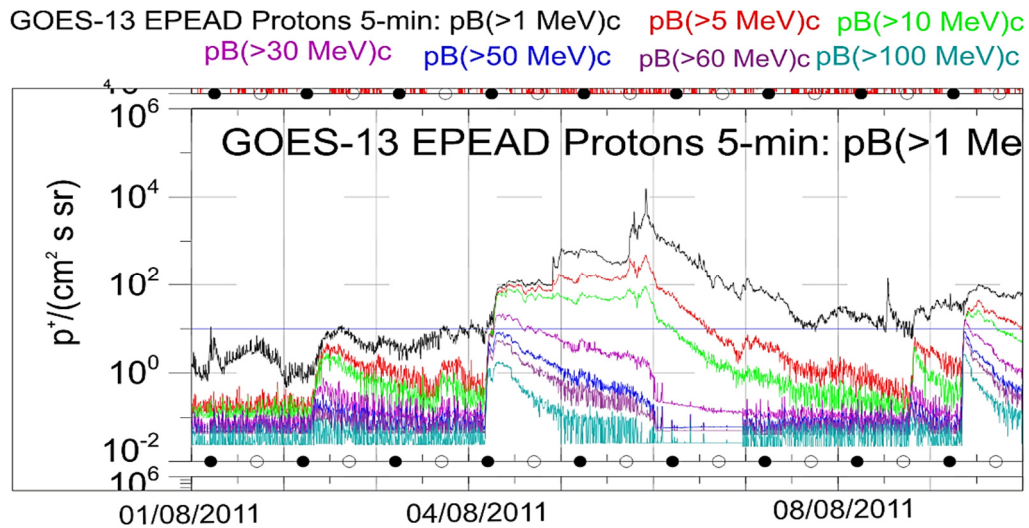


Fig. 8-31. Zoom de los datos de protones del registro de GOES-13 (04/08/2011) [GOES]

En la lista de la Tabla 8-13 solo hay 4 eventos que superan el nivel de  $1000 \text{ p}^+ \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , y únicamente el más intenso de ellos, el del día 08/03/2012, alcanza valores de un cierto nivel para los protones de más de 100 MeV. Las Fig. 8-32 y Fig. 8-33 muestra los perfiles temporales de los datos de ese evento proporcionados por la NOAA.

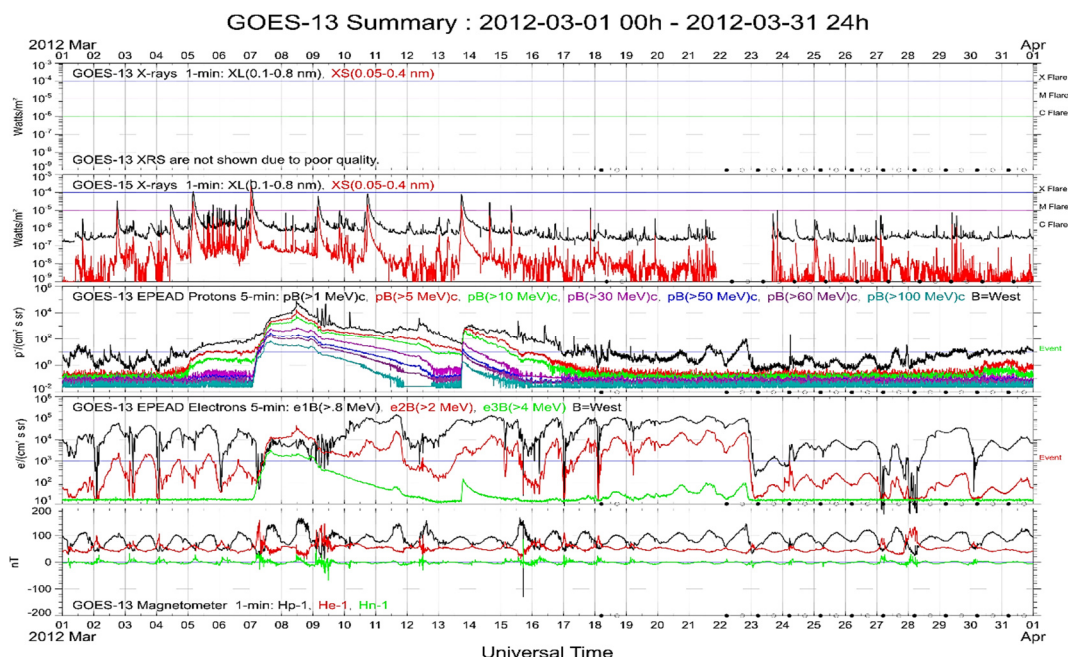


Fig. 8-32. Registro de GOES-13 del mes de marzo de 2012. Mes en el que se produjo el evento más intenso de la explotación de LDT [GOES]

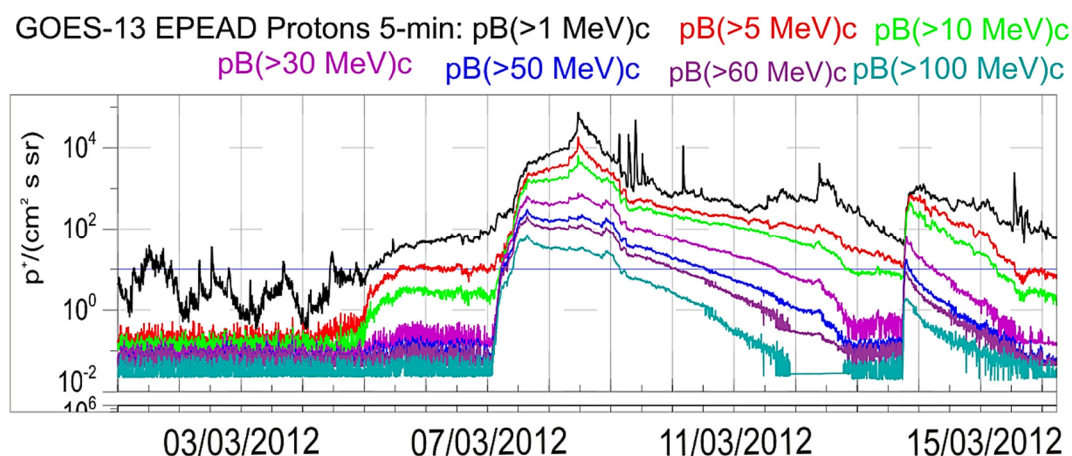


Fig. 8-33. Zoom de los datos de protones del registro de GOES-13 del evento más intenso de la explotación. (07/03/2012) [GOES]

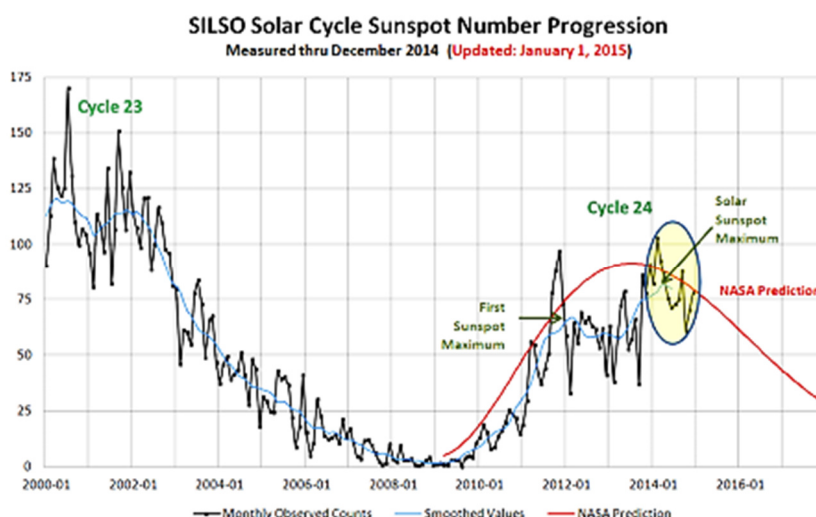
El máximo valor del flujo de protones de más de 100 MeV alcanzó  $80 \text{ p}^+ \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Si LDT hubiera estado en la misma órbita de GOES, seguramente se habría detectado este evento.

La lista de eventos mostrada en la Tabla 8-13 solo cubre hasta febrero de 2014. La NOAA actualiza esta tabla con cierto retardo. No obstante, los datos de los registros de los monitores de GOES pueden ser comprobados casi en tiempo real. Para verificar los eventos de protones hasta diciembre de 2014, se han repasado los gráficos de los datos

de GOES de todo el año. El resultado de esta verificación ha sido que en 201,4 todos los eventos fueron inferiores al del día 07/03/2012.

Así pues, no se ha detectado ningún evento porque han sido poco intensos y energéticos. Además, hay dos factores que hacen pensar que no se va a detectar ninguno en el futuro con este instrumento:

- El ciclo solar ha pasado su máximo de actividad y empieza a decaer. Por lo que se esperan menos eventos y menos intensos (Fig. 8-34)
- El ruido de LDT va en aumento: en la Fig. 8-15 se apreciaba como este ruido era  $\sim 50 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$  en 2010, y casi de  $200 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$  en 2014.



*Nota: el número de manchas solares es proporcional a la actividad del Sol, y se usa para monitorizar el ciclo de actividad solar. En 2014 se alcanzó el máximo del ciclo 24, que es en el que nos encontramos.*

Fig. 8-34. Numero de manchas solares detectadas desde el año 2000, y predicción de su evolución

#### 8.3.4.2 Falso positivo

Un fallo en la hora del satélite (*time stamp*) puede generar un falso positivo de evento solar. Esto es lo que sucedió los días 26 y 27 de septiembre de 2010.

Las TM descargadas de esos días tuvieran un corrimiento temporal de unos pocos minutos y, por ello, se le asignaron unas coordenadas orbitales equivocadas. Las coordenadas orbitales de las TM se fijan a partir de la fecha y hora de la mismas: si una TM tiene su *time stamp* erróneo, se asignan coordenadas orbitales equivocadas. El efecto es que se introduce un desplazamiento en la posición orbital de las TM, y un error al



calcular la diferencia entre la TM y el valor esperado para esa posición orbital del MOLPN.

La Fig. 8-35 muestra la diferencia entre la señal de todos los pisos de LDT y la del MOLPN. Esta diferencia alcanzó valores de hasta 30 pA, correspondientes a  $\sim 1.000 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$  de 80 MeV. Al observar los datos daba la sensación de que la AAS se hubiera movido hacia el norte más de  $10^\circ$ . Este efecto de desplazamiento se aprecia mejor en la Fig. 8-36, en la que se muestra una de las capas del MOLPN y los datos experimentales de LDT medidos esos días, y se ve como el máximo de flujo no coincide en la misma latitud.

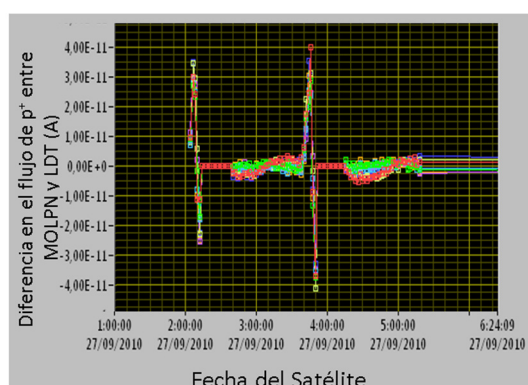


Fig. 8-35. Diferencia en la señal de ionización en los pisos de LDT y el MOLPN el 27/09/2010 (pase nocturno) en el que parece que se detecta un evento de protones

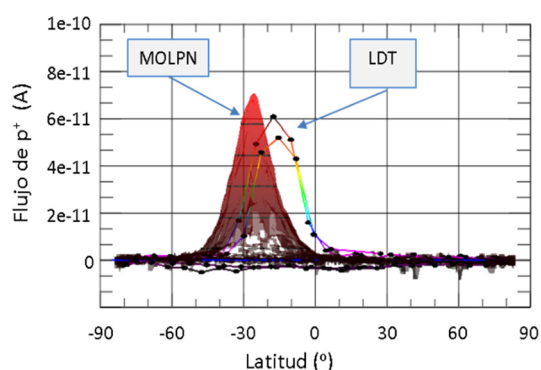


Fig. 8-36. Señal de ionización de LDT (27/09/2010 pase nocturno) y MOLPN. La AAS mostrada por LDT está desplazada al norte respecto del MOLPN

Las medidas parecían indicar que la AAS se había desplazado al hacia el Norte en los pases nocturnos, y hacia el Sur en los diurnos (Fig. 8-37 y Fig. 8-38). Algo, en principio inexplicable, resulto no ser más que un *offset* en el *time stamp* (i.e un retraso del reloj del satélite).

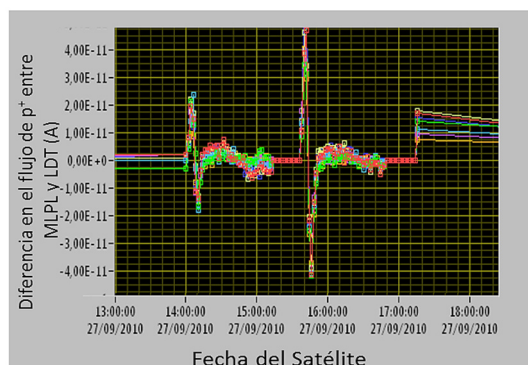


Fig. 8-37. Diferencia en la señal de ionización en los pisos de LDT y el MOLPN el 27/09/2010 (pase diurno) en el que parece que se detecta un evento de protones

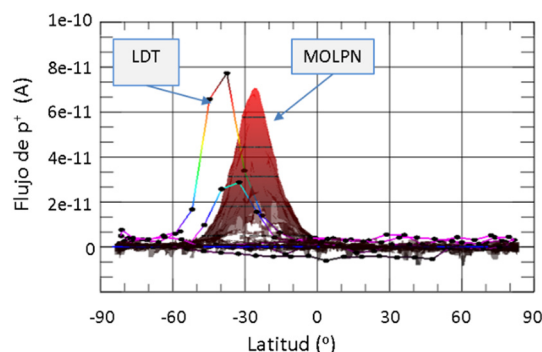


Fig. 8-38. Señal de ionización de LDT (27/09/2010 pase diurno) y MOLPN. La AAS mostrada por LDT está desplazada al sur respecto del MOLPN

Al final se demostró que era un corrimiento temporal de  $\sim 2$  minutos. Como el satélite va de Norte a Sur por la noche, y de Sur a Norte por el día, un retraso en el reloj del satélite provocaba un desplazamiento de todos los puntos adquiridos, cada punto de un lugar concreto en la órbita parecía que había sido adquirido dos minutos antes. Por eso la AAS parecía desplazada al Norte en los pases en eclipse, y al sur en los pases diurnos.



## 9 Logros, conclusiones y líneas futuras

*Se indican las aportaciones y conclusiones de este trabajo de tesis, las actividades pendientes, y las líneas de actividad futura a las que ha dado lugar este trabajo.*

*También se hablará de las primeras misiones, que son misiones de exploración del planeta Marte, en las que las tecnologías demostradas en LDT han sido utilizadas en el desarrollo de instrumentación miniaturizada para exploración planetaria.*

Este capítulo, relativo a las conclusiones, aportaciones y trabajos futuros, se ha dividido en seis secciones. En la primera se describen los trabajos realizados durante el desarrollo de LDT indicando las principales aportaciones (§9.1). En la segunda se indican las **conclusiones globales** de la tesis (§9.2). La tercera abarca las misiones en las que la tecnología desarrollada ha sido empleada en la mejora del diseño y las prestaciones de radiómetros multicanal, desarrollados para estudiar la atmosfera del planeta Marte (§9.3). Posteriormente se indican acciones en curso y por iniciar de cara a la explotación de LDT, la caracterización de los dosímetros de DD incluidos en los instrumentos para Marte, y las líneas futuras (§9.4). Los artículos en revistas y las contribuciones a congresos también se recogen (§9.5), así como los proyectos conseguidos en convocatorias públicas que han financiado parcialmente las actividades desarrolladas durante este trabajo de Tesis Doctoral, y que además contribuyen al desarrollo de algunas de las líneas futuras (§9.6).

## 9.1 Trabajos realizados y principales aportaciones

El trabajo desarrollado tuvo dos objetivos complementarios: por un lado probar diferentes dispositivos optoelectrónicos comerciales en condiciones de radiación para seleccionar los más adecuados para sistemas de comunicaciones ópticas en el interior del satélite (OWLS) y, por otro, seleccionar dispositivos óptimos para usarlos como sensores de daños por desplazamiento (DD). Este segundo objetivo, que es el principal en el marco del trabajo realizado, buscó el establecer el modo de operar cada una de las tecnologías identificadas, y elevar su nivel de madurez tecnológica para convertir, la mejor de todas ellas, en una alternativa válida para hacer dispositivos sensibles a la Dosis de Daños por Desplazamiento (TNID o DDD).

Ambos objetivos parten del hecho de que en el entorno espacial hay radiaciones ionizantes, con energía suficiente como para generar los llamados Daños por Desplazamiento (DD), que suelen ser cuantificados usando la TNID. Los DD degradan o limitan las propiedades de los sistemas espaciales afectando, en mayor o menor medida, a una diversidad de componentes, dispositivos y materiales, y en especial a los dispositivos optoelectrónicos.

La cuantificación de la Dosis Total de Ionización (TID) y la TNID permite mejorar los modelos de radiación y así optimizar las simulaciones que se usan durante la etapa de diseño. Su conocimiento resulta también esencial para corregir la respuesta de los sensores e instrumentos a medida que estos se degraden.

Si bien son varias las tecnologías disponibles para medir la TID en un sistema espacial, para la medida de la TNID las opciones disponibles son más bien escasas. De ahí el interés por mejorar los métodos y tecnologías existentes, e incluso encontrar nuevos sistemas de medida.

A continuación se citan las actividades realizadas en este trabajo, destacando los principales logros y aportaciones:

- Se ha desarrollado un procedimiento de medida y un sistema portátil para caracterizar *in situ* la variación de las principales características de emisores y receptores de luz. Este ha sido utilizado en las campañas de irradiación destinadas a seleccionar dispositivos de esta clase para su uso en espacio.
- **Se ha verificado que el sistema de caracterización y el método de medida desarrollados son válidos para protones de energías > 20 MeV.** La comprobación fue realizada comparando los resultados obtenidos para varios fotodiodos de la familia del S5107 de Hamamatsu a diferentes energías de  $p^+$  con datos de NIEL proporcionados por Summers y por Huhtinen [Vas00].
- Se ha utilizado este sistema de medida para caracterizar los DD producidos por  $p^+$  en más de 300 muestras que abarcaban 19 tipos diferentes de fotodiodos y 31 de LED, correspondientes a más de 10 fabricantes y diversas tecnologías. Cabe resaltar, que no existían datos previos en la bibliografía especializada para la mayoría de estos componentes, de ahí la novedad de las irradiaciones realizadas y los datos obtenidos.
- **Se han seleccionado entre todos los dispositivos y tecnologías caracterizadas, los LED y fotodiodos más adecuados (más robustos a la radiación) para su uso en los módulos emisor/receptor de los sistemas de comunicaciones ópticas intra-satélite (OWLS). Dichos módulos, desarrollados por INTA, se han empleado con éxito hasta la fecha en cuatro misiones/proyectos distintos:** en el satélite **NANOSAT-01**, lanzado en diciembre de 2004, en la capsula rusa **FOTON-M3**, lanzada en septiembre de 2007, en el pico-satélite **OPTOS** en órbita desde noviembre de 2013 y en el Sensor de Irradiación Solar (SIS – *Solar Irradiance Sensor*) de la misión **Mars MetNet Precursor** (§9.3.1).
- Igualmente, se han seleccionado el LED **S9338** y el fotodiodo **S5107**, ambos de Hamamatsu, como las **tecnologías sensoras de DD** más prometedoras. Su

demostración en órbita se ha llevado a cabo mediante el instrumento Las Dos Torres (LDT) en órbita a bordo del NANOSAT-1B.

- Se ha caracterizado la degradación de la potencia óptica de emisión del LED S9338 en diferentes condiciones de irradiación. Con los datos obtenidos se ha podido predecir su comportamiento en diversos ambientes espaciales. La caracterización realizada en Tierra se ha visto completada con los datos obtenidos en vuelo. Las conclusiones más relevantes son:
  - Para la correcta predicción del comportamiento en órbita de los dispositivos tipo LED es necesario caracterizar y corregir los efectos del *annealing*.
  - El **factor de daño se puede aproximar a una constante** para los 5 primeros años en una órbita LEO (del tipo de la de NANOSAT) siendo el error cometido  $< 3\%$ .
  - Las condiciones de inyección de corriente del **modo nominal de activación** en órbita (§7.3.2) **no inducen *annealing***.
  - Por el contrario, las condiciones de inyección de corriente del **modo extendido de activación** (§7.3.2) **sí inducen *annealing***.
- Se ha caracterizado el aumento de la corriente de oscuridad del fotodiodo S5107 en diferentes condiciones de irradiación, lo que ha permitido predecir su comportamiento en las condiciones del ambiente espacial. Dichas predicciones, se han verificado comparándolas con los datos obtenidos en órbita. Estas son las conclusiones más relevantes:
  - Al igual que sucedía para los LED, es posible predecir correctamente el comportamiento bajo radiación en órbita de un fotodiodo, siempre y cuando se caractericen y se corrijan los efectos del *annealing*.
  - Los resultados obtenidos en el laboratorio para el *annealing* y la dependencia temporal de la corriente de oscuridad de un fotodiodo, son consistentes con los descritos por M. Moll [Mol02]. Adicionalmente, las conclusiones obtenidas a partir de los experimentos realizados en Tierra, se han visto respaldadas por los resultados de la explotación en vuelo de LDT durante cinco años, mejorando así las conclusiones de M. Moll, que estaban referidas a un periodo de 1 año.

- No corregir los efectos del *annealing*, bajo ciertas condiciones, supone subestimar la TNID en más de un 50 %.
- La utilización del sensor TMP-36 como referencia de temperatura en LDT ha permitido verificar que su degradación bajo radiación es despreciable por debajo de 7 krad.
- El desarrollo de LDT ha requerido de la realización de ensayos y simulaciones para la especificación de los requisitos eléctricos, estructurales y la secuencia óptica de medida de los diferentes canales y sensores.
- **Se ha desarrollado** un completo **EGSE** (*Electrical Ground Suport Equipment*), basado en LabVIEW, que permite el control, caracterización y calibración de LDT, así como el análisis de los resultados.
- Se ha utilizado este EGSE en las **pruebas de integración y verificación** del instrumento. Gracias a las pruebas de verificación se ha **mejorado** la funcionalidad y fiabilidad del propio **EGSE** de cara a su uso posterior durante la calibración final del modelo de vuelo.
- El participar en todo el proceso de desarrollo y verificación del instrumento LDT ha permitido obtener un conocimiento extenso y detallado de sus capacidades. Este conocimiento ha sido fundamental para la definición y optimización de la secuencia de medida, y ha permitido maximizar el rendimiento y funcionalidad del instrumento de cara a su explotación en vuelo.
- Se han realizado las irradiaciones de calibración de LDT. De los resultados se ha concluido que:
  - La cota superior de la fluencia equivalente acumulada de  $p^+$  de 10 MeV (TNID – Dosis Total de Daños por Desplazamiento) durante el ensayo de calibración del modelo FM ha sido calculada en un valor de  $\sim 3,2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  ( $< 180 \text{ rad}$ ). Pero, en general, en ningún punto del instrumento se ha superado  $1,6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  ( $< 75 \text{ rad}$ ).
  - La cota superior de la TNID acumulada durante el ensayo de la determinación de las energías umbrales y las pruebas previas realizadas sobre el modelo QM de LDT ha sido calculada en un valor de  $\sim 9,6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  ( $< 530 \text{ rad}$ ). En

general, ningún punto del instrumento ha superado  $3,9 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  ( $< 150 \text{ rad}$ ).

- Gracias a la experiencia adquirida durante este proceso de calibración, y basándose en los resultados expuestos anteriormente, se concluye que **la protección de metacrilato** destinada a apantallar la radiación recibida por la electrónica del instrumento, es innecesaria. **Su eliminación permitirá simplificar el procedimiento de alineación y el análisis de los datos, mejorando así la precisión de la dosimetría en futuras calibraciones**, pues se ha demostrado que esta protección afectó a la uniformidad del haz de protones.
- El uso de las energías umbrales de los pisos para la calibración de LDT ha permitido obtener las matrices de daño y que estas sean triangulares. Esto es necesario para asegurar que todas las ecuaciones sean independientes entre sí, y que el sistema sea compatible y determinado. No obstante, los elementos de la matriz deben determinarse con una incertidumbre inferior al  $\sim 5\%$  para obtener un resultado en donde la propagación de errores no se dispare.
- Las matrices de los fotodiodos han mostrado mejores características que las de las matrices de los LED, pues tienen una estructura triangular bien definida y las incertidumbres relativas de sus elementos son menores.
- La calibración del instrumento LDT requiere también de la calibración de la respuesta térmica de los fotodiodos y los LED de todos los pisos. Dicha calibración permite corregir la deriva térmica existente en órbita.
- De la comparación de los resultados de unos pisos con otros, los cuales han recibido distinta TNID, se demuestra que **la dependencia térmica de los LED y fotodiodos depende de la radiación** recibida. Por tanto, la validez de **los parámetros de la calibración térmica no es extensible a toda la fase de explotación**.
- **Es necesario recalibrar la respuesta en temperatura durante la explotación en órbita de forma periódica**. Para ello se ha ideado una estrategia de activación de LDT que aprovecha las excursiones térmicas orbitales.
- Se diseñó un plan de explotación y activación de LDT cuyo objetivo principal, además de la obtención de datos en vuelo del entorno de radiación, era verificar los distintos

modos de medida y tecnologías implementadas. Este plan de explotación contemplaba estudiar dos tipos de efectos: los efectos transitorios proporcionales a la ionización generada por el flujo de protones, y los efectos acumulados proporcionales a los DD.

- Los efectos transitorios proporcionales al flujo se han medido monitorizando la señal de ionización en los fotodiodos.
- Los efectos acumulativos proporcionales a los DD se han medido de dos formas distintas: usando la degradación permanente de los LED y usando el aumento de la corriente de oscuridad de los fotodiodos.
- El plan de activación de LDT definido ha cubierto las necesidades de la explotación para verificar el buen funcionamiento de las tecnologías sensoras empleadas en LDT. Dicha verificación se ha realizado obteniendo medidas con las distintas tecnologías, y comparándolas con las predicciones de los modelos de protones atrapados y con datos obtenidos con otros sensores de referencia.
  - LDT mide la **TNID** de tres formas que han sido comparadas entre sí:
    - Método directo: usando la **degradación** acumulada por DD de la potencia óptica del **LED**.
    - Método directo: usando la **degradación** acumulada por DD de la corriente de oscuridad del **fotodiodo**.
    - Método indirecto: **integrando la señal de ionización de los fotodiodos**.
  - LDT mide los efectos transitorios de ionización por medio de un método directo, usando la **corriente de ionización** generada en el **fotodiodo**. Estas medidas se usan para **mapear la AAS** de una única manera.
  - Las comparaciones realizadas con los modelos de protones atrapados se han llevado a cabo por medio de tres tipos de simulaciones:
    - Simulación de la dosis usando un modelo estructural 3D del satélite<sup>30</sup>. Solo válido para el primer año de explotación.

---

<sup>30</sup> Realizada por *Área de segmento vuelo y gestión de proyectos* del INTA

- Simulación de la dosis recibida usando una esfera hueca de aluminio. Válido para los 5 años de explotación gracias a que se han actualizado los parámetros orbitales del satélite año a año.
  - Simulando de los mapas de la AAS a distintas alturas.
    - Las simulaciones han sido verificadas comparándolas con los datos de los RadFet.
- **En líneas generales, los datos de LDT concuerdan con las simulaciones, y por tanto con las medidas experimentales de los RadFet. No obstante, los mejores resultados se han obtenido con los datos del fotodiodo, tanto para el método directo como para el indirecto.**
- La excentricidad de la órbita de NANOSAT ha permitido mapear la AAS a distintas altitudes. Cada mapa experimental ha sido comparado con su equivalente simulado obtenido con los modelos estándar de protones atrapados (AP-8 Max, AP-8 Min, CRRESPRO Active flux, CRRESPRO Quiet flux y PSB97). De todos los modelos de protones atrapados comparados, **los mapas de la AAS del PSB97** (que es un modelo específico de órbitas LEO) **son los que mejor se ajustan a los datos experimentales de LDT.**
- Se han usado los mapas de la AAS para generar un modelo experimental de los protones atrapados en el entorno orbital de NANOSAT. Dicho modelo se ha bautizado como *Modelo Operativo Local de Protones de NANOSAT-1B* (MOLPN). Su utilidad principal es la de predecir cuál es el flujo esperado de protones en cada posición orbital por la que pasa NANOSAT para comparar con el valor medido y así identificar fluctuaciones del flujo que podrían tener su origen en una tormenta solar.
- No ha sido posible detectar ninguna tormenta solar en los 5 años de explotación.
- Se han estudiado los eventos solares que han llegado a afectar el entorno terrestre gracias a los registros de los monitores de la constelación de satélites GOES, y se ha comprobado que ninguno ha superado el umbral de detección de LDT.
- La probabilidad de detectar una tormenta solar disminuye con el paso del tiempo por dos motivos, el primero es que la actividad solar está disminuyendo, y el segundo, es que el ruido de las señales de LDT están aumentando.



## 9.2 Conclusiones

- El sistema experimental, la metodología y el procedimiento de medida que han sido desarrollados para la caracterización de fotodiodos y LED y la posterior selección de dispositivos optoelectrónicos, han sido validados a lo largo de este trabajo. Este sistema ha sido utilizado para la irradiación y caracterización de 50 tipos de dispositivos distintos (más de 300 unidades en total). Estos dispositivos han sido ordenados en función de la degradación que sufren por radiación.
- Los 5 tipos más adecuados han sido utilizados con éxito en aplicaciones de comunicaciones ópticas embarcadas en el interior del satélite.
- **El trabajo desarrollado ha permitido el desarrollo de diversas técnicas para la medida de TNID o DDD en vuelo, partiendo desde su concepción en papel, hasta la demostración de su correcto funcionamiento a bordo de NANOSAT y, por tanto, hasta alcanzar un nivel de madurez tecnológica (TRL - *Technology Readiness Level*) de 9 sobre 9:**
  - Para su uso como sensores de DD se han seleccionado el LED S9338 y el fotodiodo S5107. Los ensayos de caracterización realizados en Tierra, en condiciones de espacio, junto a la constatación de que su respuesta era predecible con el modelo matemático de degradación, otorgó a estas **tecnologías un TRL 5.**
  - La irradiación de los prototipos de LDT, formados solo por apilamientos de fotodiodos, demostró que la matriz de los factores de daño es triangular al irradiar con protones de las energías umbrales de los pisos del apilamiento, y esta demostración empírica del principio de funcionamiento elevó **el TRL de los apilamientos de fotodiodos hasta un el nivel 6.**
  - Las campañas de calificación espacial, que no han sido objeto de este trabajo, han supuesto para los **apilamientos de fotodiodos y las tecnologías sensoras empleadas en LDT** alcanzar el **TRL 7.**
  - Las campañas de irradiación para calibrar LDT han mostrado que la respuesta de la corriente de oscuridad a la TNID producida por una fluencia de protones, es la esperada y, con ello, **los apilamientos de fotodiodos han alcanzado un TRL 8** bajo irradiación frontal. Sin embargo, no ha sido así para **los apilamientos de LED que han presentado una respuesta diferente a la**

- esperada.** Por esta razón, los resultados proporcionados no permiten aprovechar la estructura de torre.
- Finalmente, la explotación en órbita ha demostrado que los **fotodiodos y los LED**, usados de forma individual, dan resultados que concuerdan con las simulaciones y con los sensores de referencia, y por ello han demostrado tener un **TRL 9**.
- Algunas de las ideas propuestas a lo largo de este trabajo para el desarrollo de sensores de TNID y DD no han podido ejecutarse; han resultado fallidas o requieren de un mayor desarrollo y madurez para su correcta implementación. En particular nos referimos a:
- Los apilamientos de LED no se han comportado como se esperaba durante las campañas de irradiación. Como se ha discutido en este trabajo, **los motivos** por los cuales los LED no han generado una matriz triangular podrían ser varios: efectos de la **radiación secundaria** producida en la estructura de LDT o en la máscara de metacrilato de protección, efectos no deseados de **la electrónica de alimentación de los LED** o **efectos térmicos**.
  - La excepción al buen funcionamiento general del instrumento LTD son solo algunos pisos de la Torre de LED para los que se han encontrado discrepancias entre los resultados obtenidos y las predicciones de los modelos. Sin embargo, en estos pisos, la respuesta expresada en corriente es similar a la del resto de LED. Como se ha discutido, esto parecería también indicar que la discrepancia encontrada tiene su origen en los resultados de la calibración. Por este motivo, se concluye que **hubo algún problema aún no determinado** en algunos pisos concretos **durante la calibración de los LED**.
  - El concepto de apilamiento no ha podido demostrarse con ninguna de las tecnologías debido al nivel de ruido encontrado en las señales y a la falta de la calibración lateral.
  - Tampoco ha sido posible estudiar la dirección de incidencia de los protones en las órbitas estudiadas, ya que a lo largo de su vida, el sistema de orientación de NANOSAT no ha sido puesto al servicio de LDT, y, por tanto, no se ha podido orientar en las distintas direcciones requeridas para realizar el estudio.

- **El uso de la medida de la corriente de oscuridad de un fotodiodo como método para medir TNID ha demostrado ser idóneo** ya que, por un lado está basado en una tecnología pasiva, por otro los resultados obtenidos han sido muy positivos y, además, es una tecnología con gran facilidad de implementación. Adicionalmente, el uso de esta tecnología de forma activa, sirve también para monitorizar los flujos de partículas que generan efectos transitorios de ionización. Es por ello que, con el fin de tener una medida directa de los DD recibidos, se ha introducido un fotodiodo ópticamente aislado en los instrumentos que el Departamento de Cargas Útiles y Ciencias del Espacio del INTA ha desarrollado para la explotación del planeta Marte en diferentes misiones internacionales.
- En la Tabla 9-1 se muestra un resumen de los TRL alcanzados por cada tecnología y forma de operación.

Tabla 9-1. TRL alcanzado por las diferentes configuraciones sensoras de LDT y sus tecnologías

Dispositivo sensible	Tipo de efecto	Efecto	Efecto macroscópico observable	Nivel de Madurez Tecnológica (TRL – <i>Technologi Readiness Level</i> )		
				Dispositivo individual	Apilamiento	
					Incidencia frontal	Cualquier incidencia
LED [L9338]	Permanente	DD	Decaimiento de la potencia óptica. Se ha solucionado los efectos de <i>annealing</i> .	TRL 9	TRL 2	TRL 2
Fotodiodo [S5107]			Aumento de la corriente de oscuridad.			
	Permanente	DD	Se ha demostrado que la corrección de <i>annealing</i> es válida, al menos 5 años, y esto lo habilita para este tipo de medidas.	TRL 9	TRL 8	TRL 2
	Transitorio	Ionización	Generación de corriente de ionización. Ya era conocido y usado con este fin.	TRL 9	TRL 8	TRL 2

### 9.3 Los dosímetros de DD de LDT en Marte

Los grupos de trabajo del INTA, en el que se ha desarrollado LDT, también han desarrollado varios radiómetros multicanal para medir la irradiancia solar en la superficie del planeta Marte. Estos radiómetros han sido denominados de manera genérica SIS (*Solar Irradiance Sensor*). SIS está basado en el uso de fotodiodos p-i-n de silicio (familia del S1337 de Hamamatsu), complementados con un filtro interferencial y una novedosa máscara de limitación del campo de visión (FoV – *Field Of View*). Dichos fotodiodos fueron seleccionados en base a su mejorada respuesta en la región del UV (UltraVioleta), a que su respuesta a los DD es solo apreciable en la región del NIR (*Near InfraRed*), a su rango extendido de temperatura de operación y, por último, al resultado de otras pruebas ambientales realizadas.

Como estos sensores sufren una degradación en la región del NIR, y esa degradación falsea las medidas ópticas, se consideró clave, para mejorar la precisión de los resultados, añadir un fotodiodo cuya corriente de oscuridad era monitorizada, realizándose así una medida directa de los DD. Esto permite corregir la medida óptica de la irradiancia obtenida por los sensores de este tipo de radiómetro. En la versión desarrollada para *Mars MetNet Precursor* (§9.3.1) se usó el mismo tipo de fotodiodo que se empleaba en los canales ópticos para medir de forma directa, justo la degradación de esa misma tecnología. Sin embargo, en el resto de misiones, y visto que se necesitó complementar el diseño óptico con unos filtros de densidad óptica que también sufren una degradación en función de la radiación recibida, se decidió usar los mismos fotodiodos empleados en LDT, y que han demostrado funcionar bien para determinar la TNID.

En las secciones siguientes, se da una breve descripción de las misiones para las que han sido desarrollados los SIS con el monitor de DD de LDT incorporado. Aunque el principal objetivo de este monitor sea el de determinar los DD de la optoelectrónica a fin de corregir la deriva de los datos debida a la degradación de su cadena óptica de sensado, este sensor proporcionará datos reales que ayudarán a conocer mejor la radiación recibida tanto en el trayecto a Marte como en su superficie, siendo de gran utilidad para el diseño de misiones venideras.

### 9.3.1 Mars MetNet Precursor Mission - MMPM

La misión MetNet es un nuevo tipo de misión científica para la exploración marciana que ha sido ideada por el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI – *Finnish Meteorological Institute*).

La misión MetNet usará para aterrizar un vehículo semirrígido llamado MenNet Lander (MNL), un misil balístico ruso que impacta sobre la superficie de Marte quedando clavado verticalmente (Fig. 9-1). El objetivo

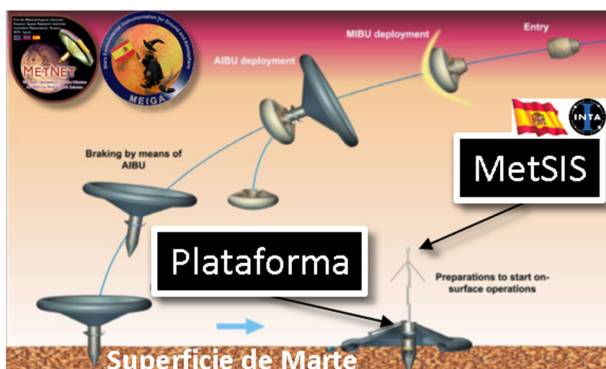


Fig. 9-1. Aterrizaje y ubicación de MetSIS

es diseminar por toda la superficie de Marte varias decenas de MNL con cargas útiles científicas para el estudio atmosférico.

El primer paso para el éxito de MetNet es demostrar el modo de aterrizaje, para ello surge la *Mars MetNet Precursors Mission* (MMPM) cuyo objetivo es principalmente tecnológico: demostrar el modo de aterrizaje y verificar el funcionamiento de todos los instrumentos tras el gran impacto. El desarrollo del MMPM estuvo a cargo del **consorcio** formado por el **FMI** (Finlandia), el Instituto de Investigaciones Espaciales de la Academia de Ciencias Rusa (**IKI**) junto con la empresa rusa *Lavochkin Association* (**LA**), y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (**INTA**) en colaboración con la Universidad Complutense de Madrid (**UCM**) como principales integrantes españoles.

La contribución española fue MEIGA (*Mars Environmental Instrumentation for Ground and Atmosphere* – Instrumentación medioambiental para la atmosfera y el suelo de Marte), y uno de los

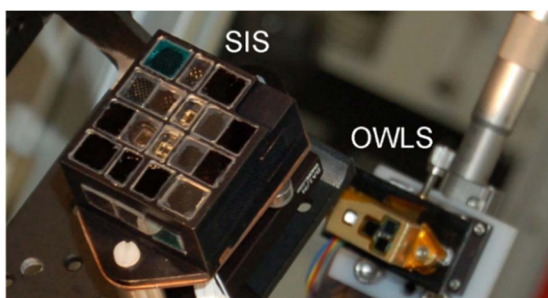


Fig. 9-2. MetSIS

instrumentos desarrollados fue el Sensor de Irradiancia Solar (MetSIS – *Solar Irradiance Sensor*) (Fig. 9-2). El SIS además de incluir un fotodiodo (S1337-33BQ) para determinar los DD en los elementos optoelectrónicos, está equipado con un sistema de comunicaciones ópticas apuntado para establecer las comunicaciones entre el MetSIS situado en lo alto de la antena y el ordenador de a bordo. Los LED y fotodiodos de este

módulo de comunicaciones fueron también elegidos en base a los resultados de esta tesis en relación a la selección de dispositivos para los módulos OWLS.

La sonda encargada de transportar al primer MNL era la sonda rusa FOBOS-GRUNT, pero por diversos motivos se decidió que no era factible contar con la MeNet Precursor en esta misión. La FOBOS-GRUNT fue lanzada en noviembre de 2011 y no se inyectó en la órbita correcta y no activaron la etapa para ir a Marte. Terminó cayendo en enero de 2012 en el Océano Pacífico.

Tras el fracaso de la FOBOS-GRUNT todos los instrumentos han quedado calificados y preparados para ser usados en el futuro. De manera nominal, si la Agencia Espacial rusa plantea la idea de una Phobos Grunt 2, se contará con la MetNet Precursor.

El INTA organizó una jornada para mostrar las capacidades de todos los instrumentos que habían quedado desarrollados y establecer actuaciones futuras. En la Fig. 9-3 se muestra información presentada en este encuentro en el que se indican algunas características del SIS y de su canal de corriente de oscuridad.



## I.- El SIS Actual

### Capacidades del SIS:

- Irradiancia de 11 bandas (28 canales)
- Ángulo solar (2 Sensores – 4 Canales)
- Temperatura (2 canales)
- **Señal de Oscuridad** (Un Canal)

Characteristics	Conditions	Typ	Noise	Unit
Dark Signal Channel	@ -70°C	1.02	-	mV
	@ -2°C	32.2	-	mV
	@ 24°C	52.7	3.86	mV
	@ 57°C	3260	-	mV

- Evaluación de daños en los SENSORES.
- Información de las partículas de altas energías

### 9.3.2 El programa Exomars (2016, 2018)

El programa Exomars nació (Fig. 9-4) con el objetivo de estudiar la posibilidad de que hubiera vida en Marte, realizar estudios meteorológicos, y demostrar el funcionamiento *in situ* de algunas tecnologías esenciales para posibles misiones futuras de ida y vuelta, con el objeto de traer muestras marcianas y posibilitar las misiones tripuladas. La Agencia Espacial Europea (ESA – *European Space Agency*) es el promotor del programa y lo está desarrollando conjuntamente con la Agencia Espacial Federal Rusa (**Roscosmos** – *Роскосмос*).



Fig. 9-4. El programa Exomars



Fig. 9-5. Fases del aterrizaje del EDM de Exomars 2016

El programa está dividido en dos misiones: Exomars 2016 y Exomars 2018. Exomars 2016 tiene como objetivo llevar a Marte un orbitador (TGO – Trace Gas Orbiter) y un nuevo módulo de aterrizaje (EDM – Entry, Descent and Landing Demonstrator Module) para demostrar su funcionamiento (Fig. 9-5). Exomars 2018 incluye un rover (Fig. 9-6) para poder moverse por la superficie de Marte tomando y analizando muestras del suelo y el subsuelo de diferentes localizaciones.



Fig. 9-6. Prototipo del rover de Exomars 2018



## A. Exomars 2016

La aportación del INTA a Exomars 2016 es un nuevo radiómetro multicanal (SIS – *Solar Irradiance Sensor*) diseñado específicamente para formar parte de DREAMS (*Dust Characterisation, Risk Assessment, and Environment Analyser on the Martian Surface*) (Fig. 9-7) que es un conjunto de sensores para medir la velocidad y dirección del viento (MetWind), la humedad del aire (DREAMS-H), la presión atmosférica (DREAMS-P), la temperatura del suelo (MarsTem), la carga eléctrica de la atmosfera (MicroARES) y la densidad óptica de la atmosfera (SIS) (Fig. 9-8).

En esta ocasión este radiómetro solo posee 3 bandas espectrales y un total de 7 canales ópticos, dos de temperatura y el canal de corriente de oscuridad para evaluar los DD basado en un S5106 (Fig. 9-9).

El instrumento ha sido completamente calificado y calibrado, y el modelo de vuelo ha sido entregado para su integración en el EDM.

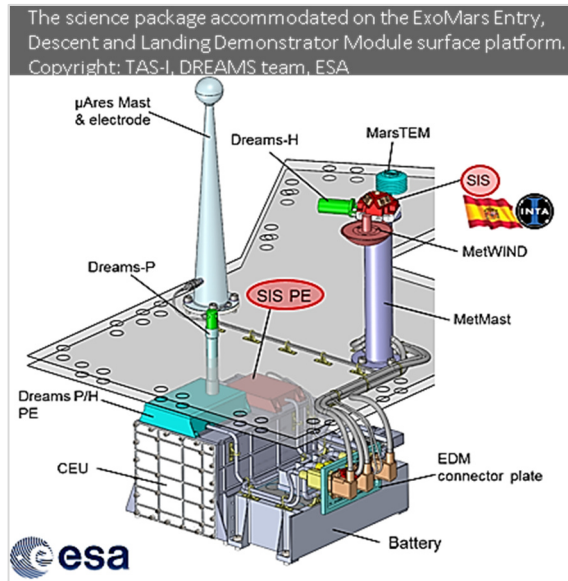


Fig. 9-7. Vista general de los instrumentos de DREAMS de Exomars 2016 en el EDM

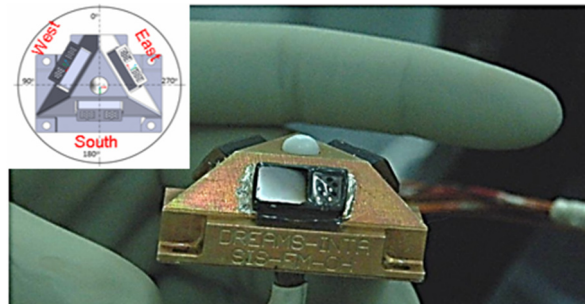


Fig. 9-8. Cabeza óptica del SIS de Exomars 2016

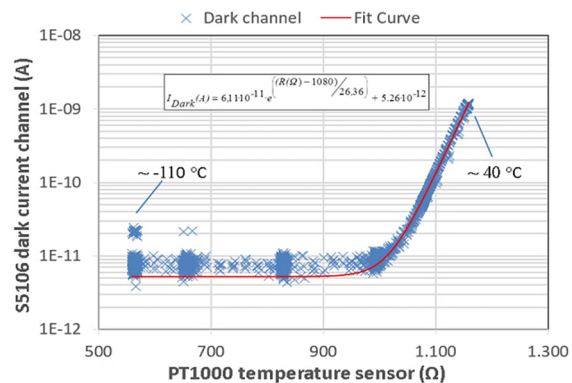


Fig. 9-9. Corriente de oscuridad del S5106 del SIS de Exomars 2016



## B. Exomars 2018 Rover

Está en evaluación una porción de la carga útil del Rover de Exomars 2018, el INTA aspira a introducir en él un nuevo modelo del SIS. Aún no se ha confirmado esta nueva oportunidad de vuelo, pero se cuenta con una gran experiencia en este tipo de instrumentos para Marte y las posibilidades de conseguirlo son altas. En dicho SIS se introducirá un sensor de DD basado en la corriente de oscuridad de un S5106 o un S5107 para reducir las incertidumbres de las medidas ópticas introducidas por los efectos del ambiente de radiación.

### 9.3.3 Mars 2020 Rover

El Mars 2020 Rover (Fig. 9-10) forma parte del programa de exploración marciana de la NASA. Este programa tiene cuatro objetivos generales: determinar si hubo vida, caracterización climática con miras a su pasada habitabilidad, estudios geológicos y preparación del “terreno tecnológico” para un viaje tripulado a Marte. El rover está equipado con diferentes instrumentos (Fig. 9-11) para cubrir algunos de estos objetivos.

La aportación española es MEDA (*Mars Environmental Dynamics Analyzer*), un conjunto de instrumentos meteorológicos liderado por el CAB (Centro de Astrobiología, INTA-CSIC). Dentro de este conjunto de instrumentos hay un SIS denominado RDS (*Radiation and Dust Sensor*) (Fig. 9-12) que está siendo desarrollado por el INTA, y que tiene el sensor de DD basado en la corriente de oscuridad de un S5107.

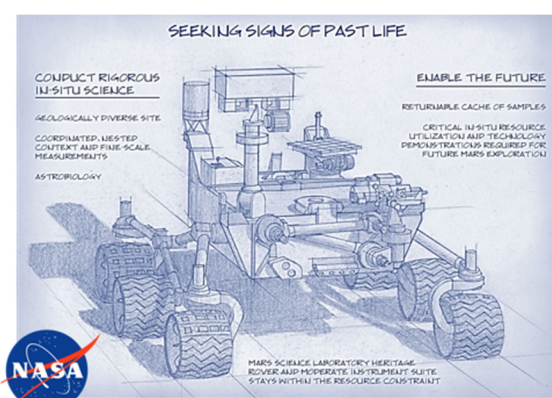


Fig. 9-10. El Rover de Mars 2020

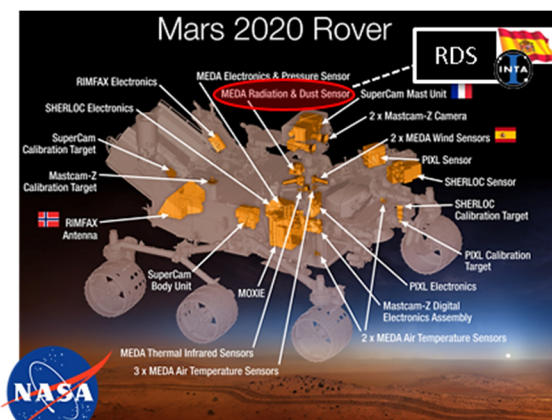


Fig. 9-11. Ubicación del RDS en el Rover

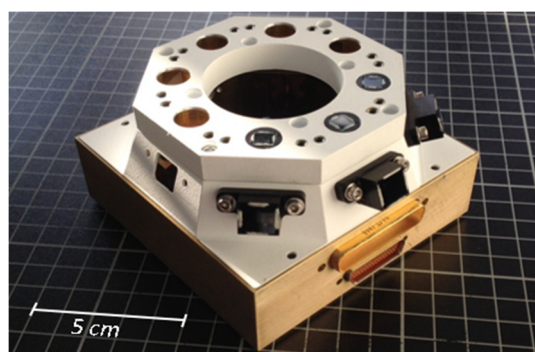


Fig. 9-12. Modelo de ingeniería para ensayos de ciclado térmicos del RDS de MEDA en integración

## 9.4 Trabajos pendientes y líneas futuras de I+D

Como se ha explicado al principio de este trabajo de tesis, el entorno de radiación espacial es uno de los principales condicionantes del diseño electrónico en una misión. Por este motivo, el INTA pretende mantener una línea de trabajo, de carácter tecnológico, destinada a probar y caracterizar la degradación de distintos dispositivos y tecnologías, a fin de catalogarlas en función de su sensibilidad a la radiación. Esto permite determinar el tiempo de vida útil de cada una de ellas en función del tipo de misión y, por otro lado, seleccionar las más sensibles como posibles candidatos a nuevos sensores de radiación. Esta fue la motivación principal que ha impulsado los trabajos de LDT y los del instrumento *The Two Towers* (TTT), que es una evolución de LDT y del que se hablará en § 9.4.1.

En esta sección también se van a comentar las verificaciones que aún faltan por realizar en la explotación de LDT (§9.4.2) y, finalmente, se describirá brevemente el camino que se va a seguir en el desarrollo de los sensores de DD que han sido incluidos en los radiómetros multicanal (SIS) diseñados para Marte (§9.4.3).

### 9.4.1 Laboratorio de ensayo en órbita: TTT – SEOSAT / INGENIO

Con la intención de seguir la línea de trabajo de ensayo de tecnologías y desarrollo de monitores de radiación se propuso, y fue admitido, el monitor de radiación *The Two Towers* (TTT) como carga útil secundaria del Satélite Español de Observación de la Tierra (SEOSAT / INGENIO) (Fig. 9-13). TTT es una evolución del instrumento Las Dos Torres descrito en este trabajo de tesis, y actualmente está ya diseñado y se han fabricado los modelos eléctricos y de ingeniería.



Fig. 9-13. SEOSAT / INENIO

TTT está formado por dos apilamientos perpendiculares (Fig. 9-14) de 5 tecnologías diferentes (Fig. 9-15). Cada torre (TTT- A y TTT- B) estará orientada con su parte frontal mirando al exterior y alineada con un orificio realizado en la estructura del satélite para reducir la protección a la radiación incidente. A fin de evitar la entrada de luz y las partículas de muy baja energía que podrían saturar y degradar en exceso el primer piso de TTT, dicho apertura será tapada con una fina película opaca.

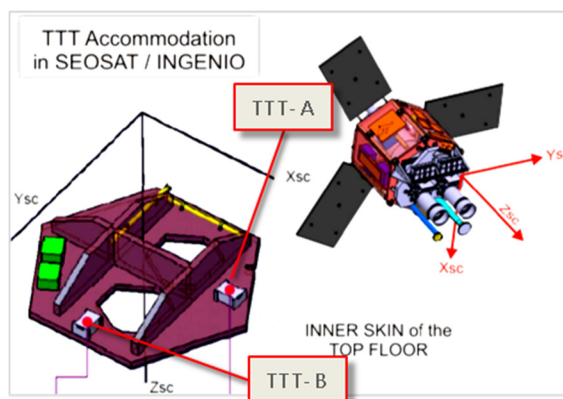


Fig. 9-14. Ubicación de TTT en SEOSAT / INENIO

Exp.	Technology	Dosimetry	Measure	Resolution	Quantity
1	PIPS detector	Particle Flux	Current	$1 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	16
2a	PIN Photodiode	Fluence DD	Current	$25\cdot 10^3 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$	16
2b	PIN Photodiode	Particle Flux	Current	$2.5 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	16
3	LED <sup>(1)</sup>	Fluence DD	Current	$25\cdot 10^3 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$	16
4	RadFET	TID	Voltage	0.2 rad	17
5	Temperature Sensor	TID	Voltage	1 rad	3

Fig. 9-15. Tecnologías sensoras para TTT

En el diseño de TTT se han introducido tecnologías maduras y fiables para medir radiación, como son los RadFet y los PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*) de Canberra, que actuarán como referencias fidedignas, y que serán usadas con una doble intención: asegurar la fiabilidad y precisión de las medidas del entorno de radiación con fines científicos, y servir como referencia para comparar el resultado del resto de tecnologías incluidas en TTT. No obstante también existe cierto grado de innovación en el uso de estas tecnologías maduras, ya que se van a operar de forma novedosa para intentar optimizar su respuesta espectral y la direccionalidad de la incidencia de partículas. Se han incluido también las tecnologías ya probadas en LDT (los fotodiodos p-i-n de silicio, el S5107 y el LED de homo-unión S9338). Los S5107 se operarán igual que en LDT, pero en el caso de los LED se han introducido mejoras para reducir los efectos térmicos, mejorar la precisión en la inyección de corriente y reducir, aún más, los efectos del *annealing*.

También se va a aprovechar esta oportunidad para probar un nuevo dispositivo COTS que se degrada linealmente con la radiación. Este dispositivo es el TMP-36. El TMP-36 se degrada rápidamente con el TID acumulado, si recibe más de  $\sim 7$  krad (Fig. 9-16). La idea, es pre-irradiarlos por encima de esta dosis antes de integrarlos en TTT, con el fin de utilizarlos como dosímetros de ionización al igual que un RadFet. Aunque todavía faltan algunos aspectos por resolver, especialmente los relacionados con su

*annealing*, ya se han montado y probado los primeros modelos formados por el propio TMP-36, una resistencia calefactora para actuar sobre la temperatura del conjunto y un sensor de temperatura de alta precisión, insensible a la radiación, para medir la temperatura del conjunto (Fig. 9-16).

En 2012 quedaron fabricados el modelo eléctrico y el modelo de ingeniería de TTT. Los elementos sensores para los modelos de calificación y de vuelo fueron seleccionados y pre-calibrados. La financiación quedó interrumpida en 2012, y desde entonces la actividad no ha sido reanudada.

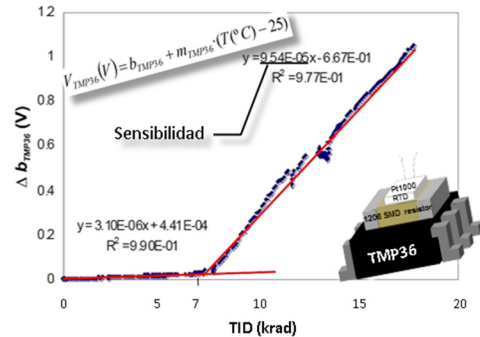


Fig. 9-16. Calibración del TMP-36 para TTT [Gon13]

#### 9.4.2 Verificaciones pendientes en la explotación de LDT

En directa relación con la explotación de LDT y la caracterización de sus tecnologías son varias las actividades pendientes.

En primer lugar, queda profundizar en el estudio del *annealing* que sufren los LED en órbita a consecuencia de la acción de las activaciones y la inyección de corriente. Para realizar dicho estudio se han planificado una serie de acciones que permitirán recabar la información necesaria. En primer lugar, se ha desconectado LDT. El instrumento fue activado por última vez en diciembre de 2014. Se pretende volver a activarlo antes de finales de 2015. Primero con activaciones nominales, después con activaciones extendidas y, por último, se alternarán activaciones con niveles de inyección de corriente en los LED altos, con otros bajos. Los resultados se usarán para obtener un modelo del *annealing* en función de la inyección de corriente para condiciones reales en órbita. El estudio terminará con la inyección de la corriente más alta posible y durante el mayor tiempo permitido, con el fin de maximizar el *annealing* y recuperación del LED. Una vez concluida esta fase, se pretende volver a la operación nominal del instrumento para comprobar si su sensibilidad a la radiación (el factor de daño) vuelve a ser como al principio. Cabe recordar que los LED pierden sensibilidad a la radiación con la acumulación de los DD y por ello se quiere comparar la recuperación de la sensibilidad en órbita con la de laboratorio. Esto podría tener importantes implicaciones prácticas en diferentes aplicaciones.

Otra cuestión abierta en LDT, es la relacionada con la construcción en forma de torre y la anisotropía en la respuesta que esto genera. Este hecho fue comprobado en el acelerador de protones pero en vuelo no ha podido ser constatado. Para demostrarlo se han planteado dos posibles soluciones:

- Realizar un **nuevo tipo de activaciones** que no ha sido implementado hasta la fecha, debido a posibles incompatibilidades y/o problemas con el satélite o el con el sistema de ACS. Inicialmente, no se tenía la seguridad de que el sistema de ACS pudiera hacer maniobrar el satélite de la forma requerida, pero una vez estuvo el satélite en órbita se nos informó que respondía adecuadamente. Esto permitió realizar una propuesta para este nuevo modo de activación, en el que se necesita sincronizar la orientación del satélite, los pases sobre la AAS y las activaciones del instrumento. La propuesta fue aceptada y se consideró viable, pero hasta la fecha solo ha sido posible realizar algunas pruebas y no se ha realizado ninguna activación bajo este modo. Se espera que en el futuro esta situación cambie, pues este modo de activación permitirá estudiar la respuesta del LDT en función, no solo de la altura y posición geográfica, sino también en función de la orientación del instrumento.
- **Correlacionar las medidas ya realizadas con LDT con la orientación que tenía el satélite al realizarlas durante la adquisición.** De este modo, si las orientaciones del satélite han sido las adecuadas durante los pases por la AAS y se dispone de suficientes datos, se podría analizar la dependencia de la señal de LDT con el ángulo de orientación del satélite.

Si se identifica, por alguno de los dos métodos anteriores, que hay una dependencia de la respuesta de LDT con la orientación del satélite, y además se consigue identificar la dirección de incidencia de los protones y datos experimentales de esa orientación, se podrá realizar una análisis como el descrito en §2.1.2.4 para el caso frontal y obtener así información espectral del entorno de radiación. Si el resultado es el predicho por los modelos, se conseguirá elevar el nivel de madurez tecnológica del apilamiento de fotodiodos hasta un TRL 9, en vez del TRL 8 actual, mostrado en la Tabla 9-1.

### 9.4.3 Sensores de DD en la exploración de Marte

Las condiciones de trabajo de los fotodiodos en los SIS, desarrollados para las diferentes misiones de exploración marciana, no son las mismas que en LDT. Por esta razón, aún hay ciertas actuaciones pendientes de completar.

En el caso de la misión MetNet, el fotodiodo empleado como sensor de DD es el mismo que se ha usado en los canales ópticos del SIS. Se seleccionó este fotodiodo, en vez del S5107 como en LDT, para usar el mismo dispositivo que se usa para medir la luz del sol, y así asegurar que la degradación sufrida por ambos es exactamente la misma. Con el fin de asegurar las mismas condiciones de trabajo y degradación, el detector de DD está polarizado en las mismas condiciones que los canales ópticos (a -0,5 V) y emplea la misma cadena electrónica de acondicionamiento y adquisición. Entre las actividades pendientes, se encuentra la irradiación de este fotodiodo con una cadena electrónica idéntica a la que se ha montado en el modelo de vuelo. El objetivo es obtener la relación entre la corriente de oscuridad, el TNID y la responsividad.

El SIS de DREAMS, desarrollado para la misión Exomars 2016, incluye un S5106 para la medida de DD. En este caso se decidió usar un fotodiodo de la misma familia del empleado en LDT debido a su mayor TRL y al conocimiento que se tiene del dispositivo gracias a las pruebas ya ejecutadas y a los resultados obtenidos en la explotación del LDT. Sin embargo, y en relación al diseño electrónico, el sensor de DD emplea la misma cadena de adquisición electrónica y la misma polarización de - 0,5 V, que los canales ópticos. Al igual que en MetNet, se va a realizar una campaña de irradiación en las mismas condiciones que en vuelo para obtener los parámetros de degradación bajo dichas condiciones.

Por último, el sensor de irradiación solar que está actualmente en desarrollo para el Rover de Mars 2020 (RDS – *Radiation and Dust Sensor*) incluirá un S5107 (el mismo de LDT), polarizado en condiciones similares a las de LDT y operar en condiciones similares a las de la explotación en órbita de LDT. Se pretende, además, realizar una irradiación de un conjunto de S5107 para seleccionar de entre todos los probados, el que muestre mejores características. Los dispositivos seleccionados se montarán en el instrumento de vuelo ya calibrado, al igual que se hizo en LDT.



## 9.5 Publicaciones científico técnicas

Se detallan las publicaciones en las que ha participado el doctorando. Se presentan clasificadas según las categorías del *Journal Citation Report*® (JCR) en las que están encuadradas.

### 9.5.1 Índices bibliométricos de la producción científica asociada a la investigación realizada

A continuación, en la Tabla 9-2, se muestran datos bibliométricos asociados a las revistas en la que se han publicado los trabajos asociados a esta investigación. En particular se detalla el factor de impacto indicado en JRC de *Thomson Reuters* [JCR], y el cuartil en el que se sitúan estas revistas en las diferentes categorías en las que están recogidas (datos del 2014).

El *JRC Science Edition* fue consultado en la plataforma *Web of Science* (WOS) [WOS] con la licencia que gestiona la Fundación Española para la Ciencia y Tecnología (FECYT)

**El factor o índice de impacto** mide la ‘repercusión y relevancia’ que ha tenido una revista en la literatura científica a partir del análisis de las citas que han recibido los artículos que se han publicado en ella. Permite comparar revistas, establecer *rankings* en función de este factor y reflejar la relevancia relativa de cada título [FECYT\_II].

**El cuartil de una revista en JCR** es un indicador que sirve para evaluar la importancia relativa de una revista dentro del total de revistas de su área. Para calcularlo se ordenan las revistas en orden descendente por factor de impacto. Se divide el total de revistas en cuatro partes iguales. Cada parte es un cuartil. Las revistas con el factor de impacto más alto se encuentran en el primer cuartil (Q1), y las revistas con el factor de impacto más bajo se encuentran el cuarto cuartil (Q4) [FECYT\_I].

.

Tabla 9-2. Factor de impacto y posición en los diferentes rankings del JCR de las revistas en las que ha publicado el doctorando

Revista	Categoría	# total de revistas en la categoría	Posición que ocupa la revista en el ranking	Cuartil	Factor de impacto
IEEE – TNS <sup>1</sup>	<i>Engineering, electrical &amp; electronic</i>	249	120	Q2	1,283
	<i>Nuclear Science &amp; Technology</i>	34	6	Q1	
JACIC <sup>2</sup>	<i>Engineering, Aerospace</i>	30	7	Q1	1,000
IEEE – JSAC <sup>3</sup>	<i>Engineering, electrical &amp; electronic</i>	249	16	Q1	3,453
	<i>Telecommunications</i>	77	4	Q1	
JMM <sup>4</sup>	<i>Engineering, electrical &amp; electronic</i>	249	85	Q2	1,731
	<i>Instrument &amp; Instrumentation</i>	56	19	Q2	
	<i>Materials Science Multidisciplinary</i>	259	113	Q2	
	<i>Mechanics</i>	137	42	Q2	
	<i>Nanoscience &amp; Nanotechnology</i>	79	45	Q3	

- <sup>1</sup> TNS: *Transitions on Nuclear Science*  
<sup>2</sup> JACIC: *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*  
<sup>3</sup> JSAC: *Journal on Selected Areas in Communications*  
<sup>4</sup> JMM: *Journal of Micromechanics and Microengineering*

## 9.5.2 Revistas internacionales

- [Gon13] M. Gonzalez-Guerrero, J. J. Jiménez, C. Hernando, M. T. Álvarez, and H. Guerrero, “**Dosimeter for The Two Towers in SEOSAT-INGENIO base don TMP36**”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 60, No. 4, August 2013, pp. 2461-2468. DIO: 10.1109/TNS.2013.2257848
- [Jim12] J. J. Jiménez, J. M. Oter, V. Apéstigue, C. Hernando, S. Ibarmia, W. Hajdas, J. Sánchez-Páramo, M. T. Álvarez, I. Arruego, and H. Guerrero, “**Proton Monitor Las Dos Torres: First Intercomparison of In-Orbit Results**”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 59, No. 4, August 2012, pp. 1092-1098. DIO: 10.1109/TNS.2012.2198241
- [Tam10] Remo Tamayo, José Alonso, Juan José Jiménez, Ignacio Arruego, Héctor Guerrero, “**OpticalWireless Links for intra-Satellite Communications: Reflection Models and Hardware Optimization**”, *AIAA Journal Of Aerospace Computing, Information and Communication*, Vol. 7, No. 3, pp:118-133, Iss. 12, 2010. DOI: 10.2514/1.30271.
- [Arr09] Arruego, I. Guerrero, H. Rodriguez, S. Martinez-Oter, J. Jimenez, J.J. Dominguez, J.A. Martin-Ortega, A. de Mingo, J. Rivas, J. Apestigue, V. Sanchez, J. Iglesias, J. Alvarez, M.T. Gallego, P. Azcue, J. Ruiz de Galarreta, C. Martin, B. Alvarez-Herrero, A. Diaz-Michelena, M. Martin, I. Tamayo, F. Reina, M. Gutierrez, M. Sabau, L. Torres, J., “**OWLS: a ten-year history in optical wireless links for intra-satellite communications**”, *IEEE*



Journal in Selected Areas on Communications, Issue 9, Vol. 27, pp. 1599-1611, December 2009. DOI:10.1109/JSAC.2009.091210.

- [Ber05] S. Bermejo, P. Ortega, [J.J. Jimenez](#), L. Castañer. "**Response of c-Si PV arrays under monochromatic light for MEMS power supply**". Journal of Micromechanics and Microengineering" V: 15, pp: 1446-1453, 6 de junio de 2005.

DOI: 10.1088/0960-1317/15/8/010.

### 9.5.3 Congresos internacionales con acta de congreso (*proceeding*)

- [Arr10] [I. Arruego](#), M. Díaz-Michelena, [J.J. Jiménez](#), J. Martínez, V. Apéstigue, M. González-Guerrero, J. Azcue, A. Valverde, V. de Manuel, J. A. Domínguez, I. Martín, B. Martín, J. Alvarez, M. Alvarez, C. Hernando, M.F. Cerdán, C. Ruiz de Galarreta, J. Sánchez, G. Martínez, L. Vázquez, H. Guerrero, "**Development of miniaturized instrumentation for Planetary Exploration and its application to the Mars MetNet Precursor Mission**", *Proceeding of the European Geosciences Union – 7th General Assembly, Vienna, Austria 02-07 May 2010. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010. PÓSTER.*

- [Jim07] [Jimenez J.J.](#), Sanchez-Paramo J., Alvarez M.T., Dominguez J.A., Oter J.M., Arruego I., Tamayo R., Guerrero H., "**Proton radiation effects on medium/large area Si PIN photodiodes for Optical Wireless Links for Intra-Satellite Communications (OWLS)**", *Proc. IEEE Radiation Effects Data Workshop*, 2007 Page(s):73 – 79. PÓSTER.

DOI: 10.1109 / REDW.2007.4342543.

- [Jim06] [J.J. Jimenez](#), [M.T. Alvarez](#), R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Dominguez, I. Arruego, J. Sainchez-Paramo, H. Guerrero, "**Proton radiation effects in high power LED and IREDs for Optical Wireless Links for intra-Satellite communications (OWLS)**", *proceedings of the 2006 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC 2006), Ponte Vedra Beach, Florida July 17-21, 2006. IEEE Trans. Nucl. Sci., Catalog Number 06TH8913, pp. 77-84, 2006. PÓSTER.* DOI: 10.1109/REDW.2006.295472

- [Gue06] [H.Guerrero](#), I. Arruego, S. Rodríguez, M.T. Álvarez, [J.J. Jiménez](#), J. Torres, P. Pelissou, C. Carron, I.Hernandez, P.Plancke. "**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications**" *ICSO – 6th International Conference on Space Optics. ESA/ESTEC, Noordwijk, NL, 27-30 June 2006. PÓSTER.* DOI: 2006ESASP.621E.177G.

- [Jim05] [Jimenez, J.J.](#); Alvarez, M.T.; Oter, J.M.; Dominguez, J.A.; Tamayo, R.; Arruego, I.; Guerrero, H., "**Proton Radiation effects in medium/large area photodiodes and high power LED for Optical Wireless Links for intra Satellite communications (OWLS)**", *proceedings of the 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2005), Cap d'Adge, France, 19-23 Sept. 2005 pp:PW10-1-PW10-8. POSTER.*

DOI 10.1109/RADECS.2005.4365651.

– Premiado como mejor *paper* de RADECS 2005 –

- [Jim04] [J.J. Jimenez](#), J.M. Oter, J.A. Dominguez, M.T. Alvarez, I. Arruego, P.P. Valdivieso, J. Fuentes, [H. Guerrero](#). "**Irradiation of LED and photodiodes for Optical Wireless Links for intra-Satellite communications (OWLS)**". *5th Radiation Effects on Components and Systems (RADECS-2004). Workshop, Madrid - Spain September 22-24, 2004, pp. 101-108. PRESENTACION ORAL*

## 9.5.4 Congresos internacionales

- [Jim10] [J.J. Jiménez](#), J.M. Oter, V. Apéstigue, I. Arruego, S. Ibarria, S. Esteve, J. Sánchez-Páramo, W. Hajdas, C. Hernando, M.T. Álvarez, H. Guerrero. “**Las Dos Torres: A Radiation Monitor for NANOSAT 1B**”. *Nuclear and Space Radiation effects on Components - NSREC 2010 .PH-5L. Denver, 19 – 23 julio 2010. POSTER.* <http://www.nsrec.com/latenewspubs2010.pdf>
- [Rod08] [S. Rodríguez](#), I. Arruego, N. Karafolas, P. Pelissou, F. Tortosa, B. Alison, M.T., Álvarez, V. Apestigue, J. Ázcue, J. Barbero, C. Carron, J. Catalán, J.R. De Mingo, J.A. Domínguez, P. Gallego, J. García-Prieto, [J.J. Jiménez](#), D. López, F. López-Hernández, A. Martín-Ortega, J. Martínez-Oter, G. Mercadier, F. Perán, A. Perera, R. Pérez-Jiménez, E. Poves, J. Rabadán, M. Reina, J. Rivas, H. Rouault, J. Rufo, C. Ruiz de Galarreta, D. Scheidel, C. Theroude, M. van Uffelen, J. Sánchez-Páramo, E. Armandillo, P. Plancke, H. Guerrero. “**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications**”. *ICSO – 8th International Conference on Space Optics. Toulouse, France, 14-17 octubre 2008. PRESENTACIÓN ORAL*
- [Gue07] [H. Guerrero](#), I. Arruego, S. Rodríguez, M.T. Álvarez, [J.J. Jiménez](#), J. Torres, P. Pelissou, C. Carron, I. Hernandez, P. Plancke. “**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications Development of a Demonstrator & Current Status**”. *Intl. Wireless for Space Workshop. Univ. Colorado, Colorado Springs, USA, 22 enero 2007. PÓSTER.*
- [Jim06a] [J.J. Jiménez](#), M.T. Álvarez, J. Sánchez-Páramo, R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Domínguez, I. Arruego, H. Guerrero. “**Proton irradiation of medium / large area pin si photodiodes for optical wireless links for intra-satellite communication (owls)**”, *9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2006),, Glyfada, Grecia. 27-29 de septiembre de 2006. PÓSTER.*
- [Gue10] [H. Guerrero](#), Ignacio Arruego, Marina Diaz-Michelena, [Juan J. Jiménez](#), Javier Martínez, Víctor Apéstigue, Miguel Gonzalez-Guerrero, Joaquin Azcue, Alberto Valverde, Victor de Manuel, Jose A. Domínguez, Israel Martin, Boris Martin, Javier Alvarez, Maite Alvarez, Carlos Hernando, Miguel F. Cerdán, Claudia Ruiz de Galarreta, Jaime Sanchez, German Martinez, and Luis Vazquez. “**Development of miniaturized instrumentation for Planetary Exploration and its application to the Mars MetNet Precursor Mission**” *European Geosciences Union – 7 th General Assembly – Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010. PÓSTER*
- [Cer11] Cerdán, M. F., Fernández, A. B., Jiménez, J. J. y Díaz-Michelena, M., “Witnessing variations in the Earth magnetic field by means of NANOSAT-1B COTS AMR magnetic sensor”; *Geophysical Research Abstracts*, vol. 13, EGU2011-6768-2, 2011. PÓSTER

## 9.5.5 Congresos nacionales

- [Jim11] [J.J. Jiménez](#), [F. J. ÁLVAREZ-RÍOS](#), J.M. Oter, I. Arruego, J. Azcue, M. González-Guerrero, I. Martín, G. Martínez, J. Moreno-Ventas, M. Reina, J. Rivas, C. Ruiz de Galarreta, L.M. Sánchez-Brea J. Sánchez-Páramo, Alberto VALVERDE, L. Vázquez, H. Guerrero. “**Sensor espectral de irradiancia solar para estudios atmosféricos planetarios**”. *7ª Reunión Española de Optoelectrónica - OPTOEL 2011. S1-50. Santander, España, 29 de Junio – 1 de julio 2011. PÓSTER.*
- [Ape10] [V. Apéstigue](#), [J.M. Oter](#), [C. Fernández](#), [J.J. Jiménez](#). “**Monitores de Entorno Espacial en NANOSAT 1B: Monitor de Protones Las Dos Torres (LDT) y los dosímetros RadFET**”. *Jornadas sobre resultados en órbita de Nanosat-01 y 1B. INTA, Torrejón de Ardoz, 18-19 mayo 2010. PRESENTACIÓN ORAL.*

## 9.6 Financiaciones conseguidas en convocatoria públicas

Se detallan los 10 proyectos con financiación Nacional y los 2 con financiación internacional que han soportado, parcialmente, las actividades desarrolladas en este trabajo de Tesis Doctoral, y que soportarán algunas de las líneas futuras.

### 9.6.1 En relación con la selección de dispositivos optoelectrónicos

Título del proyecto: NANOSAT: Desarrollo de comunicaciones ópticas intra-satélite. ESP 2001-4677-E

Entidad financiadora: Plan Nacional del Espacio (Acción Especial).

Entidades participantes: INTA

Duración, desde: 12/2001 hasta: 12/2002

Cuantía de la subvención: 98.000€

Investigador responsable: Dr. Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 4

---

Título del proyecto: COTS optoelectrónicos para comunicaciones ópticas difusas intra-satélite: experiencia en vuelo en el NANOSAT. ESP2002-03682

Entidad financiadora: Plan Nacional del Espacio (DGI - MCYT).

Entidades participantes: INTA (ES)

Duración, desde: 10/2002 hasta: 09/2005

Cuantía de la subvención: 135.000€

Investigador responsable: Dr. Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 5

---

Título del proyecto: Optical Wireless Layer Validation for on board data communications in an operational context. Ref. 16428/02/NL/EC

Entidad financiadora: European Space Agency – ESTEC (General Studies Program).

Entidades participantes: INTA (ES), Alcatel Space Industries (FR), UPM (ES), Tecnológica (ES)

Duración, desde: 12/2002 hasta: 04/2005

Cuantía de la subvención: 185.000€

Investigador responsable: Dr. Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 12

---

Título del proyecto: OPTOMAG – Tecnologías optoelectrónicas y magnéticas para cargas útiles: desarrollo de un susceptómetro planetario (MANTIS – MartiaN Tele-Infrared Susceptometer) ESP2005-05278

Entidad financiadora: Programa Nacional del Espacio (DGI – MEC)

Entidades participantes: INTA

Duración, desde: 12/2005 hasta: 12/2008

Cuantía de la subvención: 362.950€

Investigador responsable: Dr. Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 7

---

Título del proyecto: TRP-OWLS: Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications. A0/1-4898/05/NL/GLC

Entidad financiadora: ESA-ESTEC (TRP).

Entidades participantes: INTA, ASTRIUM (FR), Alcatel Space (FR), CRISA (ES), Tecnológica (ES), UPM (ES), ULPGC (ES), CEA (FR), SCK-CEN (BEL)

Duración, desde: 02/2006 hasta: 02/2008

Cuantía de la subvención: 1.500.000€

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 15

---

### 9.6.2 En relación con el desarrollo de LDT

Título del proyecto: Unidades optoeLectrónicaS para un DOSímeTrO y espectRómetRo Espacial – LAS DOS TORRES ESP2006-28461-E

Entidad financiadora: Programa Nacional del Espacio (DGI - MEC)

Entidades participantes: INTA

Duración, desde: 2007 hasta: 2007

Cuantía de la subvención: 25.500 € (Fase A)

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 10

### 9.6.3 En relación con el desarrollo de TTT

Título del proyecto: The Two Towers for SEOSAT / INGENIO. ACI2009-0999 T3 – Fomento de la Cooperación Científica Internacional

Entidad financiadora: MICINN (Acción Complementaria)

Entidades participantes: INTA

Duración, desde: 01/09/2009 hasta: 31/08/2010

Cuantía de la subvención: 125.000 €

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 5

Título del proyecto: The Two Towers (TTT) para SEOSAT / INGENIO - Fases C y D. AYC10-B-000528

Entidad financiadora: MICINN

Entidades participantes: INTA

Duración, desde: 2012 hasta: 2012

Cuantía de la subvención: 433.595 €

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes:

### 9.6.4 En relación con la instrumentación de exploración en Marte

Título del proyecto: MEIGA – Mars Enviromental Instrumentation for Ground and Atmosphere. AYA2008-06420-C04-01-ESP – Proyecto de investigación fundamental

Entidad financiadora: DGI - MINCIN

Entidades participantes: INTA(Coordinador), Universidad Complutense de Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Sevilla / Instituto de Microelectrónica de Sevilla

Duración, desde: 2009 hasta: 2009

Cuantía de la subvención: 827.340 € (INTA = 387.200 €)

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 20

Título del proyecto: MEIGA – Mars Enviromental Instrumentation for Ground and Atmosphere (MEIGA – MetNet). AYA2009-14212-C05-01-ESP – Proyecto de investigación fundamental

Entidad financiadora: DGI - MINCIN

Entidades participantes: INTA(Coordinador), Universidad Complutense de Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Sevilla / Instituto de Microelectrónica de Sevilla

Duración, desde: 2010 hasta: 2011

Cuantía de la subvención: 2.596.000 € (INTA = 1.190.000 €)

Investigador responsable: Héctor Guerrero Padrón (INTA)

Número de investigadores participantes: 24

Título del proyecto: DREAMS (Dust characterization, Risk assessment and Environment Analyser on the Martian Surface) - Entry and Descent Module (EDM), EXOMARS 2016

Entidad financiadora: Desde Mars Environmental Instrumentation for Ground and Atmosphere. AYA2011-29967-C05-01

Entidades participantes: ESA, TAS-I, CISAS, Univ. Padova, INTA

Duración, desde: 2013 (desarrollo) hasta: 2016 (explotación) Cuantía de la subvención: N/A (de AYA2011-29967-C05-01: 1.455.000€)

Investigador responsable: Ignacio Arruego (INTA)

Número de investigadores participantes: 7

---

Título del proyecto: Instrumentación para la investigación y ciencia atmosférica en Marte - ESP2014-54256-C4-3-R

Entidad financiadora: MINECO

Entidades participantes: INTA, CAB, US/IMSE

Duración, desde: 1/1/2015 hasta: 31/12/2015 Cuantía de la subvención: 410.000€

Investigador responsable: Ignacio Arruego (INTA)

Número de investigadores participantes: 9

---





## **Apéndice A**

### **Procedimiento de calibración de LDT**

*En este primer apéndice se han recogido los procedimientos definidos y ejecutados durante las calibraciones de LDT.*



En este apartado se va a describir la ejecución de las irradiaciones de calibración y de los pasos concretos de la misma.

### ***A.1 Energía umbral frontal***

El procediendo seguido fue el siguiente:

1. Configurar el EGSE de control de LDT para que realice de forma periódica una adquisición de ambas torres almacenando los datos de todos los sensores.
2. Se inicia la búsqueda de la energía umbral del piso  $j$  ( $P_j$ ). En la primera ronda se empieza por el Piso 1 y en las siguientes se va pasando por el  $P_2$ ,  $P_3$  hasta llegar al  $P_8$ .
3. Configurar el acelerador para irradiar con la energía  $E_i$ . En la primera ronda es la energía más baja del acelerador, en rondas sucesivas esta energía será la energía umbral del piso anterior.
4. Irradiar a flujo constante  $f_{DD}$ .
5. Se evalúa, en tiempo real, si el piso bajo estudio ( $P_j$ ) tiene señal. Si no la tiene, o la tiene y es mayor que en el paso siguiente, se pasa al siguiente punto; si es menor o afecta al siguiente piso, se pasa al punto 9.
6. Detener la irradiación.
7. Se apunta el valor de la señal.
8. Se sube un punto la energía ( $E_{i+1}$ ) y se vuelve al paso 4.
9. Detener la irradiación.
10. La energía umbral del piso bajo estudio es la apuntada en el paso 7 la última vez que se ejecutó dicho paso.
11. Para iniciar el estudio del siguiente piso, se pasa al paso 2. Esto se repetirá hasta llegar al piso 8 en una calibración completa. En una calibración parcial, los pisos bajo estudio podrían ser menos.
12. Se realiza el pre-análisis y se almacenan los datos semi-tratados.

## ***A.2 Energía umbral lateral***

El procediendo seguido fue el siguiente:

1. Configurar el EGSE de control de LDT para que realice de forma periódica una adquisición de ambas torres almacenando los datos de todos los sensores.
2. Alinear LDT en la posición correspondiente (#i). Si corresponde con una posición frontal o lateral, se salta a ejecutar el procedentico correspondiente. Al terminar ese procediendo, se volverá al punto 1 de este procedimiento.
3. Configurar el acelerador para irradiar con la energía  $E_i$ . Debe ser la energía más baja del acelerador, o al menos una en la que se esté seguro que no va a afectar a ningún piso.
4. Irradiar a flujo constante  $f_{DD}$ .
5. Se evalúa, en tiempo real, si las señales de las corrientes de oscuridad de los pisos de LDT cambian. Si no cambian, o son mayores que en el paso anterior, se pasa al siguiente punto; si algún de los pisos muestra un decaimiento de la señal (condición de energía umbral), se pasa al punto 9.
6. Detener la irradiación.
7. Se apunta el valor de las señales.
8. Se sube un punto la energía ( $E_{i+1}$ ) y se vuelve al paso 4.
9. Detener la irradiación.
10. La energía umbral de la posición de irradiación actual y de los pisos que han cumplido la condición es la apuntada en el paso 7 la última vez que se ejecutó. Si no todos los pisos se han comportado igual y se cree que alguno de los pisos tiene una energía umbral mayor, se vuelve al paso 8 hasta que se encuentre la energía umbral en todos.
11. Para iniciar el estudio de la siguiente dirección de irradiación, se pasa al paso 2. Esto se repetirá hasta irradiar LDT en todas las direcciones establecidas y en el orden establecido en la Tabla A-3 y la Tabla A-4.
12. Se realiza el pre-análisis y se almacenan los datos obtenidos.

Para iniciar el procedimiento se colocó LDT de forma horizontal, así se pudo orientar LDT en todas las posiciones horizontales, 8 en total incluyendo la trasera y la frontal. Esta última, que ya había sido medida dos años antes, se usó como verificación de que el ensayo estaba evolucionando bien. Esta verificación constó, únicamente, de la evolución de cuatro pisos (Piso 2, Piso 4, Piso 6 y Piso 8) y no de todos.

El orden seguido se muestra en la Tabla A-3, en ella también se indica el tipo de irradiación que fue: lateral, trasera o frontal de comprobación.

Tabla A-3. Orden de ejecución de las irradiaciones de búsqueda de energías umbral en los giros horizontales.

Orden	Posición de irradiación <sup>1</sup>	Denominación	Tipo de irradiación
1 <sup>a</sup>	#3	Derecha	Lateral
2 <sup>a</sup>	#7	Izquierda	Lateral
3 <sup>a</sup>	#2	Oblicua lado derecho trasero	Lateral
4 <sup>a</sup>	#4	Oblicua lado derecho frontal	Lateral
5 <sup>a</sup>	#5	Frontal	Verificación de estado tras 2 años
6 <sup>a</sup>	#1	Trasero	Frontal/Trasera
7 <sup>a</sup>	#8	Oblicua lado izquierdo trasero	Lateral
8 <sup>a</sup>	#6	Oblicua lado izquierdo frontal	Lateral

*Nota 1: ver apartado “ para una mejor identificación de cada orientación*

La búsqueda de energías traseras se realizó cuando se alineó LDT en la posición de incidencia #1. Para ello se realizó el mismo proceso que durante la determinación de las energías frontales. Se aumentó, paso a paso, la energía buscando la máxima señal sobre un piso, de tal forma que no afectase al piso posterior. Se empezó por el piso 8, se siguió por el 7 y se terminó con el piso 1, en el cual, por ser en esta ocasión el ultimo y no tener ningún piso detrás, no fue necesario contemplar que la energía seleccionada no afectase al siguiente piso.

Durante la frontal solo se hicieron algunas comprobaciones para verificar que sus energías umbrales no habían cambiado y verificar que todo estaba igual que dos años antes.

Una vez completadas todas las posiciones horizontales, se procedió a cambiar la orientación de LDT para poder realizar los giros “verticales”. En esta disposición, se repitió el proceso de la búsqueda de las energías umbrales de cada una de las 6 posiciones verticales. El orden de ejecución se muestra en la Tabla A-4:

Tabla A-4. Orden de ejecución de las irradiaciones de búsqueda de energías umbral en los giros verticales.

Orden	Posición de irradiación <sup>1</sup>	Denominación	Tipo de irradiación
9 <sup>a</sup>	#9	Oblicua Superior trasera	Lateral
10 <sup>a</sup>	#11	Oblicua superior delantera	Lateral
11 <sup>a</sup>	#12	Oblicua inferior delantera	Lateral
12 <sup>a</sup>	#13	Inferior	Lateral
13 <sup>a</sup>	#14	Oblicua inferior trasera	Lateral
14 <sup>a</sup>	#10	Superior	Lateral

*Nota 1: ver apartado “0. Selección de ángulos de incidencia” para una mejor identificación de cada orientación.*

## A.3 Calibración frontal de modelo FM

### A.3.1 DD

La calibración de los DD fue un proceso paso a paso en el que se caracterizaron los efectos sobre todos los pisos de las 8 energías umbrales. El procedimiento fue como sigue:

1. Configurar el EGSE de control de LDT para que realice de forma periódica una adquisición de ambas torres almacenando los datos de todos los sensores.
2. Configurar el acelerador para irradiar con una energía  $E_i$ . Se empieza por  $E_1$  que es la equivalente a la energía umbral más baja, la del primer piso.

3. Irradiar a flujo contante  $f_{DD}$  hasta alcanzar una fluencia de  $F_{DD}$ . Si la fluencia no es la adecuada, se pasa inmediatamente al punto 4.
4. Detener la irradiación.
5. Se verifica si se han cumplido los requisitos de flujo, fluencia y energía. Si no se han cumplido, se repiten los pasos 3 y 4 hasta un máximo de  $N_1$  veces. Si falla, se avisa a los técnicos del acelerador, si fuera necesario se desmonta LDT de delante del acelerador. Si cumple se pasa al paso siguiente.
6. Esperar al menos 10 segundos con el haz apagado.
7. Repetir desde el paso 3 un total de  $N_2$  veces.
8. Se repite el proceso desde el paso 2 configurando  $E_i$  en el siguiente valor de la lista de energías umbrales. Se termina el procedimiento al llegar a  $E_8$ . Es decir, este proceso se repetirá un total de 8 veces.
9. Se realiza el pre-análisis y se almacenan los datos obtenidos.

### A.3.2 Ionización

La calibración de los efectos de ionización fue un proceso paso a paso en el que se tenía que probar los efectos sobre todos los pisos de las 8 energías umbrales. A grandes rasgos el procedimiento fue el siguiente:

1. Configurar el EGSE de control de LDT para que realice de forma periódica una adquisición de ambas torres almacenando los datos de todos los sensores.
2. Se configura el acelerador para irradiar a un flujo contante  $f_j$  hasta alcanzar una fluencia de  $F_{ion}$ .
3. Se inicia la irradiación con una energía  $E_i$ . Se empieza por  $E_1$  que es la equivalente a la energía umbral más baja, la del piso 1. El tiempo de irradiación debe de rondar entre los 20 segundos y 3 minutos, pero si la fluencia no es la adecuada (especialmente demasiado alta), se pasa inmediatamente al punto 4.
4. Detener la irradiación.

5. Verificar si se han cumplido los requisitos de flujo, fluencia y energía. Si no se han cumplido, se repiten los pasos 3 y 4 hasta un máximo de  $N_1$  veces. Si falla, se avisa a los técnicos del acelerador, si fuera necesario se desmonta LDT de delante del acelerador. Si cumple se pasa al paso siguiente.
6. Esperar, como mínimo, 10 segundos.
7. Repetir desde el paso 3 sin modificar las condiciones de irradiación un total de  $N_2$  veces.
8. Se repite el proceso desde el paso 3 configurando  $E_i$  en el siguiente valor de la lista de energías umbrales. Es decir, este proceso se repetirá un total de 8 veces
9. Repetir desde el 2 cambiado el flujo  $f_j$  al inmediatamente superior de la lista de flujos. Esto se repite para los  $N_3$  flujos preestablecidos.
10. Se realiza el pre-análisis y se almacenan los datos obtenidos.

### A.3.3 Parámetros para la ejecución del simulacro con el QM

Los parámetros a determinar para la ejecución de los procedimientos de la calibración de DD y de ionización durante el simulacro con el QM son, en orden de aparición:

Tabla A-5. Parámetros del procediendo de calibración de los DD

Parámetro	Valor/ Valores	Descripción
$[E_i]$	[10.67; 28.78; 40.90; 50.41; 58.74; 63.54; 70.67; 80.10] MeV	Lista de energías umbrales frontales.
$f_{DD}$	$5 \cdot 10^4$ pfu/s	Flujo de irradiación constante.
$F_{DD}$	Entre $5 \cdot 10^6$ pfu y $5 \cdot 10^7$	Fluencia acumulada en cada paso de irradiación.
$N_1$	10	Número máximo de repeticiones si falla el arranque del haz de protones.
$N_2$	3	Número de repeticiones de un escalón de irradiación a una energía determinada.

Tabla A-6. Parámetros del procediendo de calibración de la respuesta a la ionización.

Parámetro	Valor/ Valores	Descripción
$[E_i]$	[10.67; 28.78; 40.90; 50.41; 58.74; 63.54; 70.67; 80.10] MeV	Lista de energías umbrales frontales.
$[f_i]$	$[1 \cdot 10^4; 5 \cdot 10^4; 1 \cdot 10^5; 5 \cdot 10^5]$ pfu/s	Lista de flujos de irradiación.
$F_{lon}$	Una fluencia tal que el tiempo de irradiación estuviera entre 1 minuto y 3 minutos. Se fijó en: <b><math>5 \cdot 10^5</math> pfu</b> en los pasos de flujo bajo; Y <b><math>1 \cdot 10^7</math> pfu</b> en los flujos más altos.	Fluencia a alcanzar en un paso de irradiación.
$N_1$	10	Número máximo de repeticiones si falla el arranque del haz de protones.
$N_2$	1	Número de repeticiones de un escalón de irradiación a un flujo y energía determinado.
$N_3$	4	Número de elementos en la lista de flujos.

### A.3.4 Parámetros para la ejecución de la calibración de FM

Los parámetros a determinar para la ejecución de los procedimientos de la calibración de DD y de ionización durante la calibración del modelo FM son:

Tabla A-7. Parámetros del procediendo de calibración de los DD

Parámetro	Valor/ Valores	Descripción
$[E_i]$	[10.67; 28.78; 40.90; 50.41; 58.74; 63.54; 70.67; 80.10] MeV	Lista de energías umbrales frontales.
$f_{DD}$	$10^5$ pfu/s	Flujo de irradiación constante.
$F_{DD}$	$5 \cdot 10^6$ pfu	Fluencia acumulada en cada paso de irradiación.
$N_1$	4	Número máximo de repeticiones si falla el arranque del haz de protones.
$N_2$	3	Número de repeticiones de un escalón de irradiación a una energía determinada.

Tabla A-8. Parámetros del procediendo de calibración de la respuesta a la ionización.

Parámetro	Valor/ Valores	Descripción
$[E_i]$	[10.67; 28.78; 40.90; 50.41; 58.74; 63.54; 70.67; 80.10] MeV	Lista de energías umbrales frontales.
$[f_i]$	$[1 \cdot 10^4; 5 \cdot 10^4; 1 \cdot 10^5; 5 \cdot 10^5]$ pfu/s	Lista de flujos de irradiación.
$F_{lon}$	Una fluencia tal que el tiempo de irradiación estuviera entre 1 minuto y 3 minutos. Se fijó en: <b><math>5 \cdot 10^5</math> pfu</b> en los pasos de flujo bajo; Y <b><math>1 \cdot 10^7</math> pfu</b> en los flujos más altos.	Fluencia a alcanzar en un paso de irradiación.
$N_1$	4	Número máximo de repeticiones si falla el arranque del haz de protones.
$N_2$	1	Número de repeticiones de un escalón de irradiación a un flujo y energía determinado.
$N_3$	4	Número de elementos en la lista de flujos.





## **Apéndice B**

### **Planos y diagramas de bloques de LDT**

*En este segundo apéndice se recogen algunos planos y diagramas de bloques relevantes de LDT.*

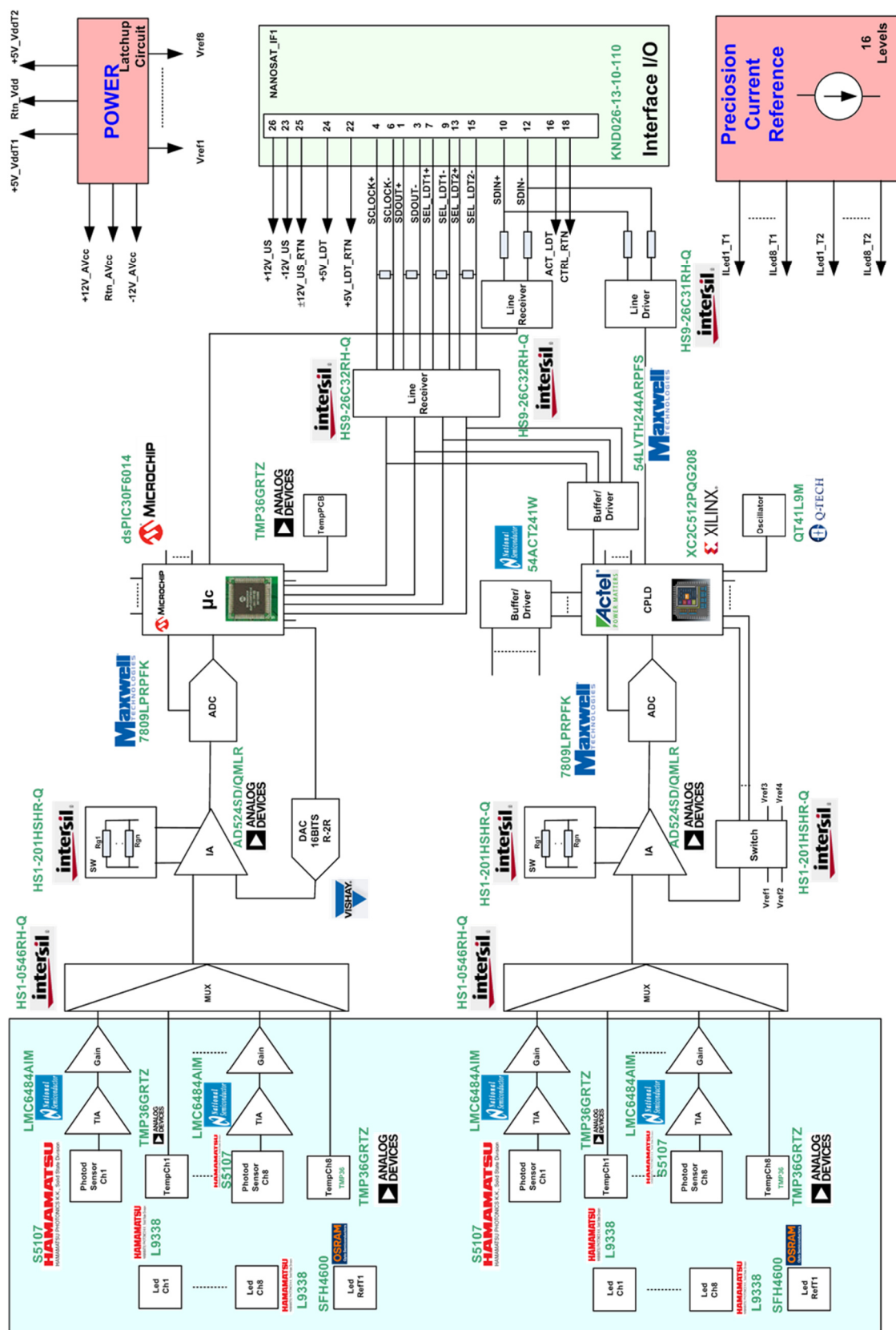
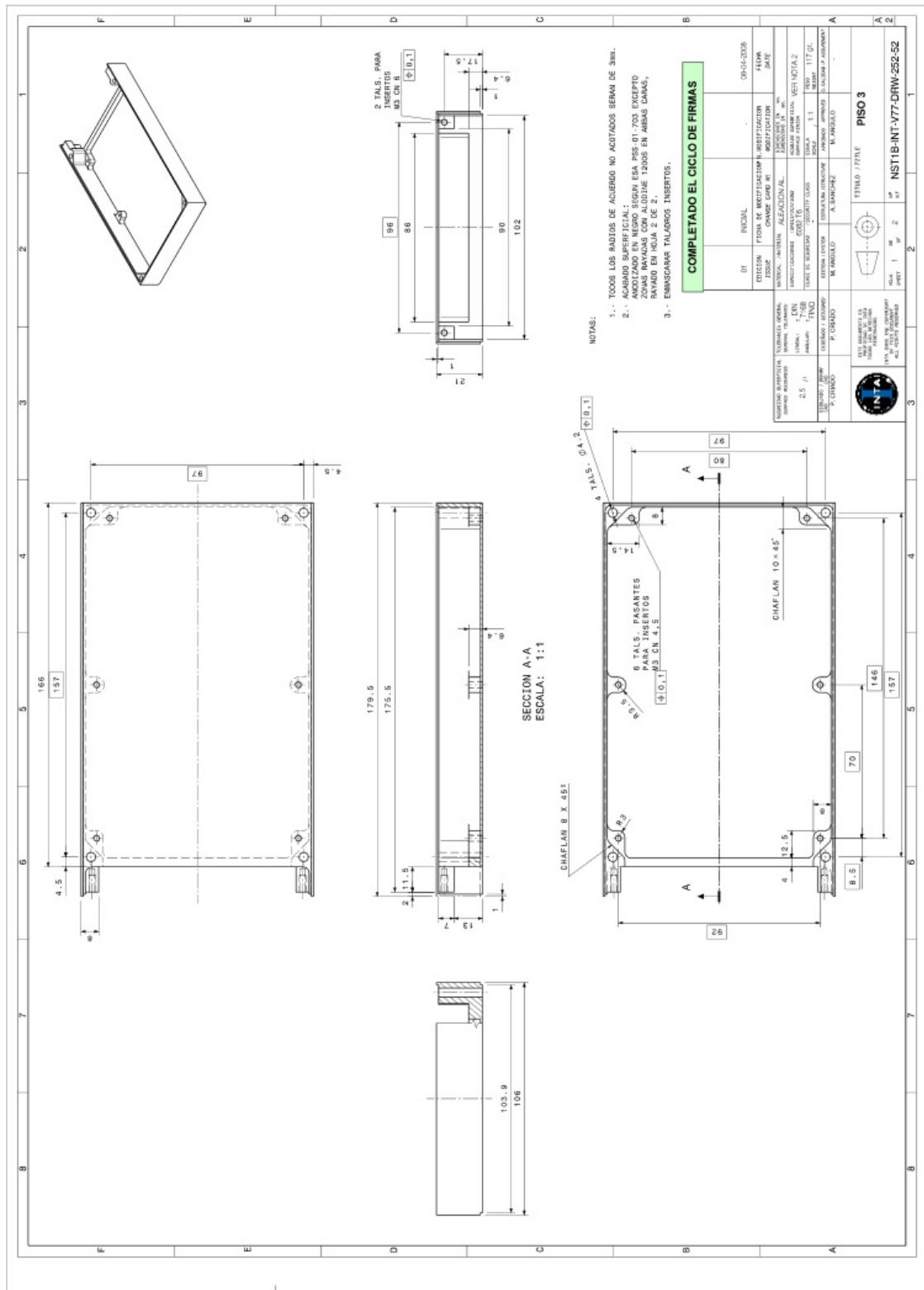


Fig. B-17. Esquema de bloques de la electrónica de sensado y control de LDT [Ape10]



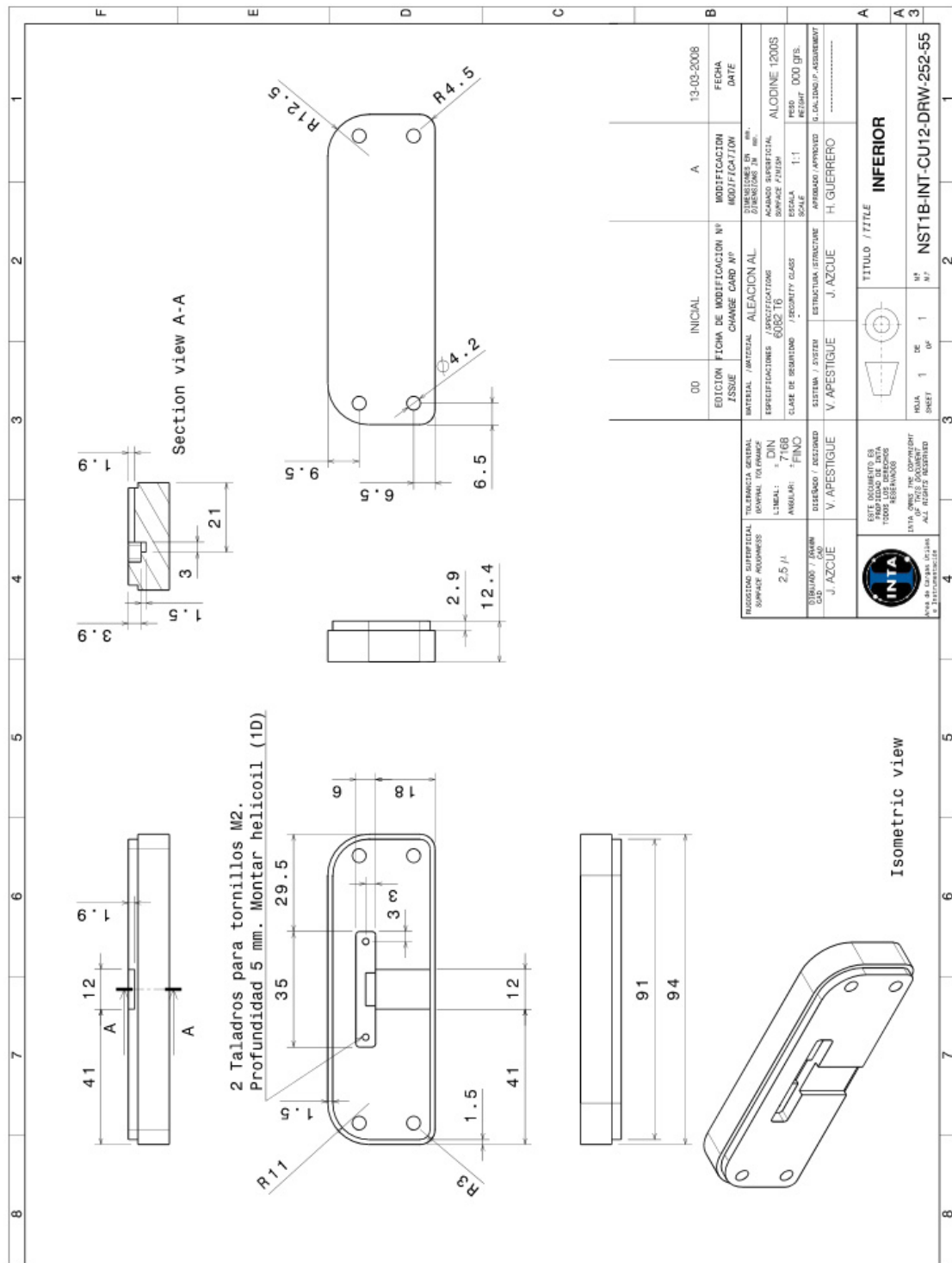


Fig. B-19. Mecánica del piso trasero

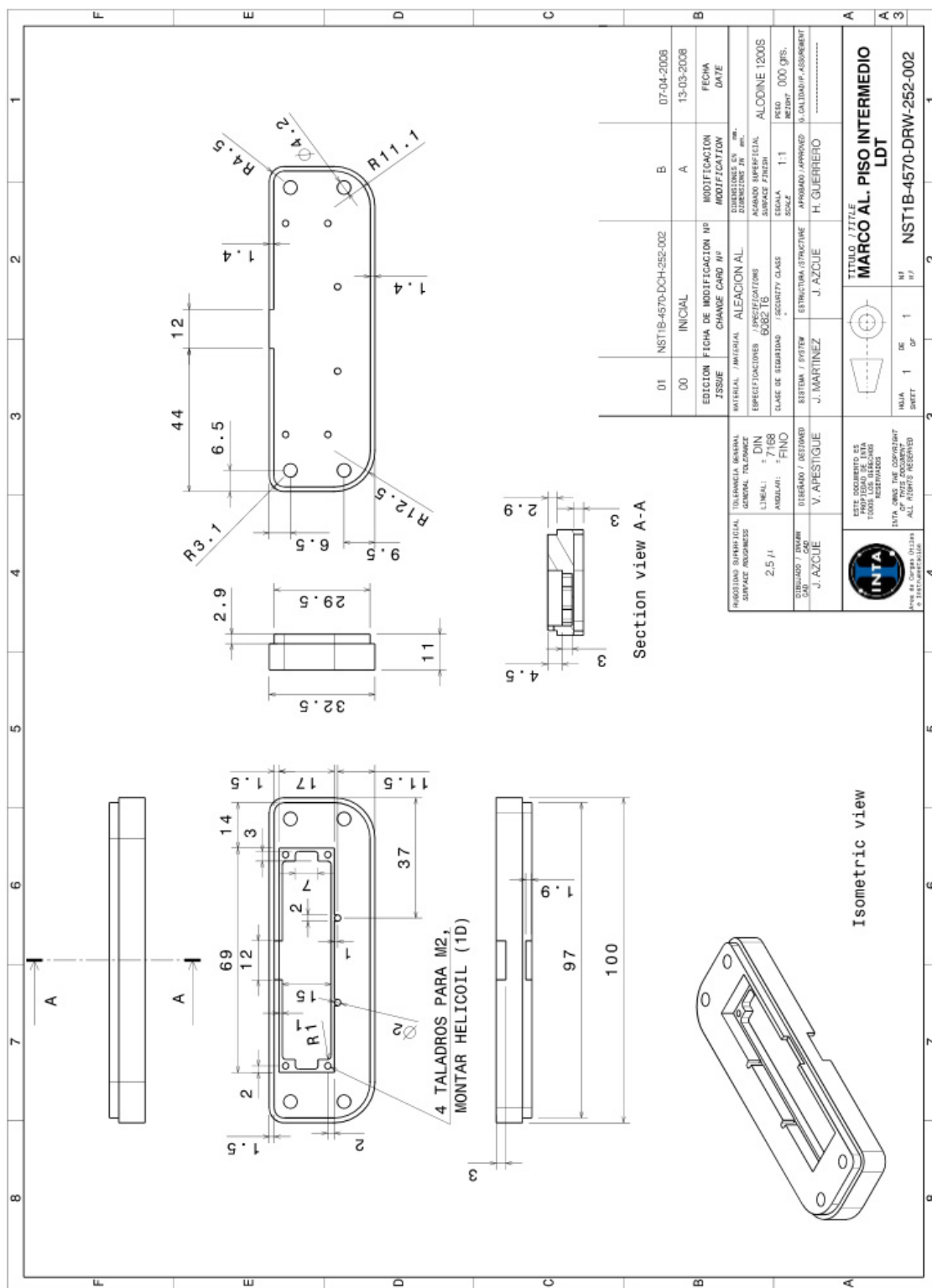
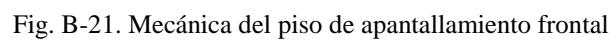


Fig. B-20. Mecánica de uno piso intermedio



## **Apéndice C**

### **Respuesta de los TMP-36 a la radiación en LDT**

*En este tercer apéndice se recogen los resultados y conclusiones de la degradación del sensor de temperatura TMP36 que se utiliza como referencia térmica para la corrección de las señales de LDT. Se concluye que su degradación es despreciable en las condiciones de LDT.*



Los resultados de la irradiación de los TMP-36 realizada durante la calibración del instrumento, se han dividido en dos partes. En la primera se muestra la respuesta a la ionización directa, en la segunda la respuesta ante la una dosis acumulada. En ambos casos se llega a la conclusión de que los efectos son despreciables.

### C.1 Sensibilidad al flujo

En la Fig. C-22 se muestra la representación cromática de las sensibilidades al flujo de los sensores de temperatura de la torre de oscuridad, sus errores absolutos, sus errores relativos y el coeficiente de correlación  $r^2$  respectivamente. Se aprecia que no tiene simetría triangular, aunque parece que la irradiación a 58,74 MeV produjo un aumento en la señal de todos los pisos, especialmente en el piso 1 y 2. No se tienen datos suficientes para afirmar que ese aumento de la señal es un efecto transitorio producido por la ionización, pues como se ve en las matrices de los resultados obtenidos en la torre de luz (Fig. C-23) los sensores de temperatura no presentan este comportamiento.

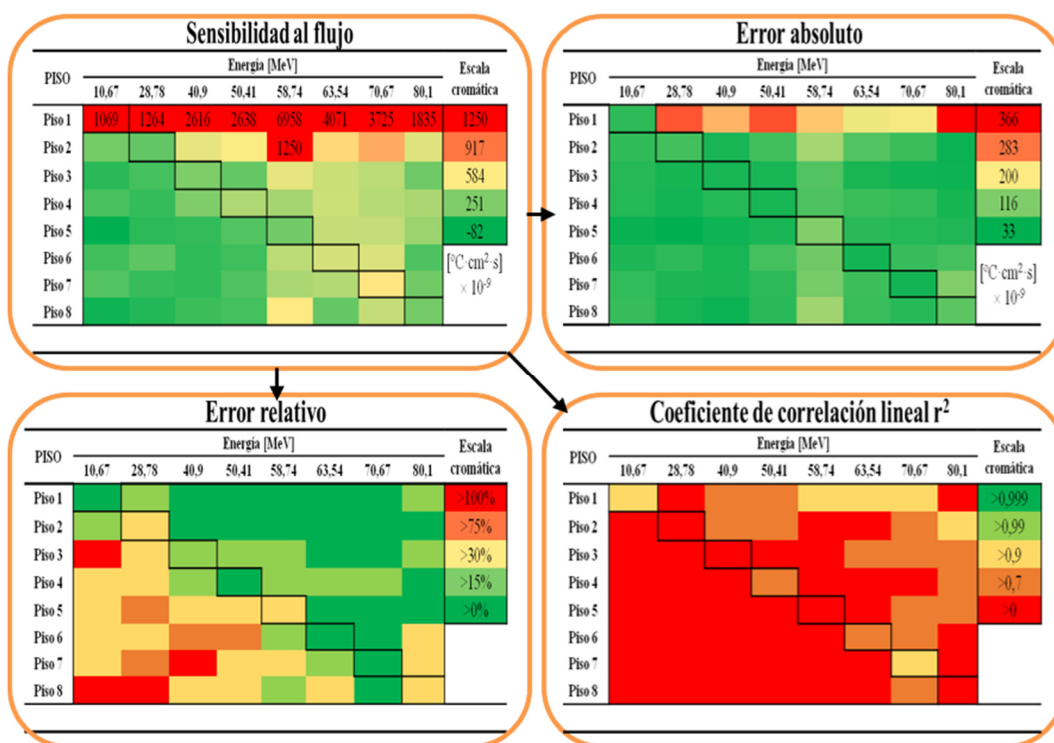


Fig. C-22. Representación cromática de la matriz de sensibilidad al flujo de la señal de los TMP-36 de la torre de oscuridad y sus errores y coeficiente de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice C

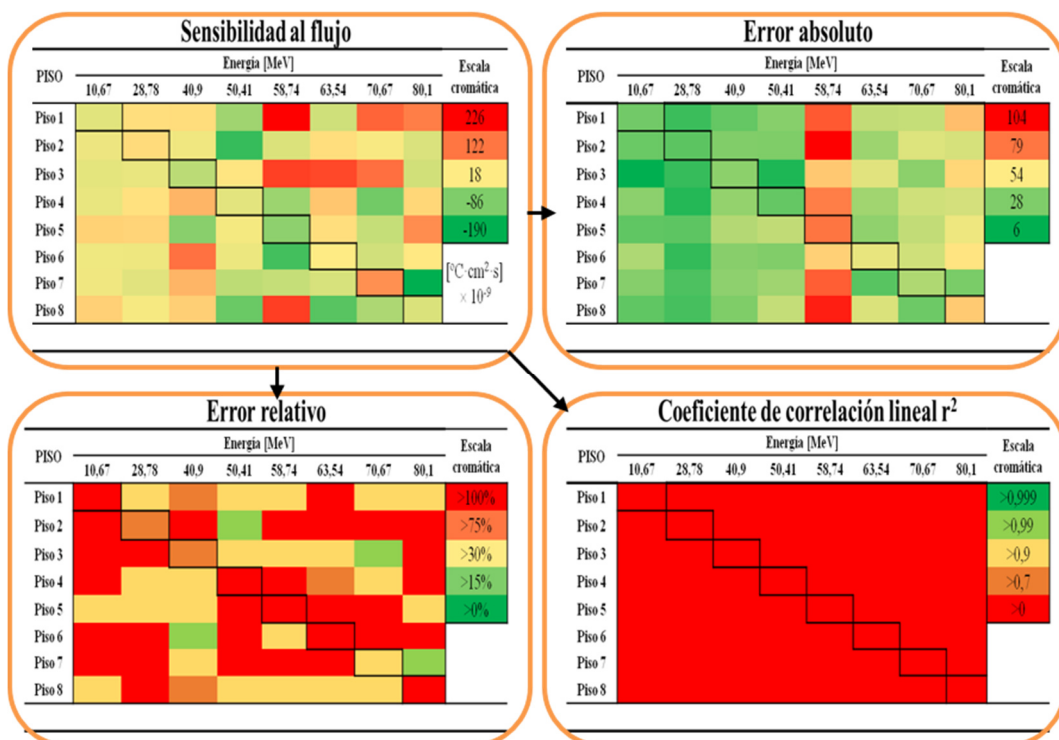


Fig. C-23. Representación cromática de la matriz de sensibilidad al flujo de la señal de los TMP-36 de la torre de LED y sus errores y coeficiente de correlación lineal. Resultados numéricos en el apéndice C

El comportamiento de los sensores TMP-36 de LDT ha sido diferente en cada una de las torres, en la Tabla C-9 se muestran algunos valores de los resultados obtenidos que lo corroboran.

Tabla C-9. Comparativa de la sensibilidad al flujo de la medida de temperatura con el TMP-36 entre ambas torres

Sensibilidad al flujo	TMP-36	
	Torre de oscuridad	Torre de luz
<b>Valor promedio</b> [°C·cm²·s] ×10 <sup>-9</sup>	~ 630	~ 12
<b>Dispersión de valores</b> [°C·cm²·s] ×10 <sup>-9</sup>	~ 1100	~ 80
<b>Valor máximo</b> [°C·cm²·s] ×10 <sup>-9</sup>	~ 7000	~ 230
<b>Valor mínimo</b> [°C·cm²·s] ×10 <sup>-9</sup>	~ -80	~ -200
<b>Δ<sub>Max</sub> T<sup>a</sup> en la AAS<sup>1</sup></b> [°C]	~ 5×10 <sup>-3</sup> [Despreciable]	~ 5×10 <sup>-4</sup> [Despreciable]
<b>Observaciones</b>	Se aprecia cierta dependencia del valor de la sensibilidad con el piso y la energía de los protones, observándose cierta tendencia a la simetría triangular	Ninguna dependencia del valor de la sensibilidad con el piso ni la energía de los protones

*Nota 1:* Se refiere al incremento que mostraría el TMP-36 al medir la temperatura por efecto de la ionización producida al incidir un flujo de protones de 10 MeV de 5000 cm<sup>-2</sup>

El hecho de que en la torre de luz los TMP-36 no tenga ninguna dependencia con el flujo de protones independientemente de su energía y del piso en el que están montados los sensores, pone de manifiesto que la señal del TMP-36 no se ve afectada por los efectos transitorios de ionización, al menos hasta el límite del error de medida. Sin embargo, las diferencias encontradas en la torre de oscuridad hacen pensar que algún elemento diferente de la cadena electrónica de esta torre sí se ve afectado por la radiación. Este efecto que solo se observa en la torre de oscuridad podría llegar a afectar a la medida de la temperatura con flujos de protones  $>10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ , los cuales no son esperados en una órbita LEO como la de NANOSAT salvo en el caso de momentos, muy excepcionales, de una gran actividad solar. Por ello los TMP-36 se consideran una buena referencia de temperatura.

## ***C.2 Factor de daño de los sensores de temperatura – TMP36***

Durante la calibración de la respuesta con la fluencia se ha evaluado también el comportamiento de los sensores de temperatura TMP-36 para validar su comportamiento y verificar que su degradación [Gon13] es despreciable y no invalida su uso como referencia térmica en vuelo.

Efectivamente, los resultados muestran que la matriz no posee ningún tipo de simetría (Fig. C-24 y Fig. C-25), es decir, que el efecto es igual para todos los TMP-36 de ambos apilamientos independientemente de la energía de los protones. Sí se observa una cierta tendencia a que todos sean positivos, es decir, aumentan ligeramente a un ritmo medio de  $1,7 \pm 3,0 \text{ n}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$  en la torre de fotodiodos y a un ritmo de  $1,9 \pm 0,8 \text{ n}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$  en la torre de LED. En el primer caso la dispersión de los valores hace que el error de la media sea superior a la media en sí, por lo que en realidad no ha sido posible medir una degradación de la señal de estos TMP-36. En el segundo caso es como si la temperatura hubiera subido  $\sim 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$  (con una incertidumbre del 42%) durante la irradiación de cada energía. La conclusión es que su degradación es despreciable.

De hecho, según se vio en irradiaciones pasadas [Gon13], el sensor se degrada a un ritmo medio de  $3,8 \pm 0,9 \text{ } \mu\text{V}/\text{rad}$  entre 0 y  $\sim 7 \text{ krad}$ . Si se transforma este dato usando la sensibilidad del TMP-36 y el LET de protones de la energía umbral del primer piso, se obtiene que equivale a  $\sim (0,2 \pm 0,05) \times 10^{-9} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ , valor que efectivamente es inferior a la dispersión de los datos encontrada durante esta calibración.

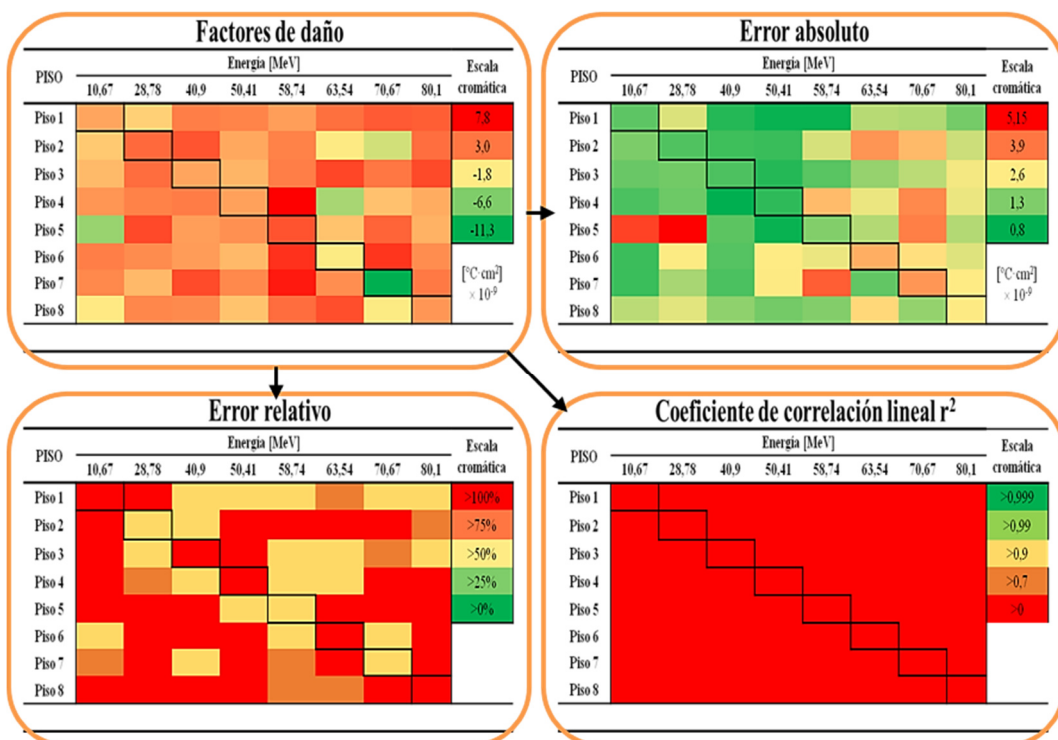


Fig. C-24. Representación cromática de la matriz de factores de daño de los TMP-36 la torre de fotodiodos y sus errores y coeficiente de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice C

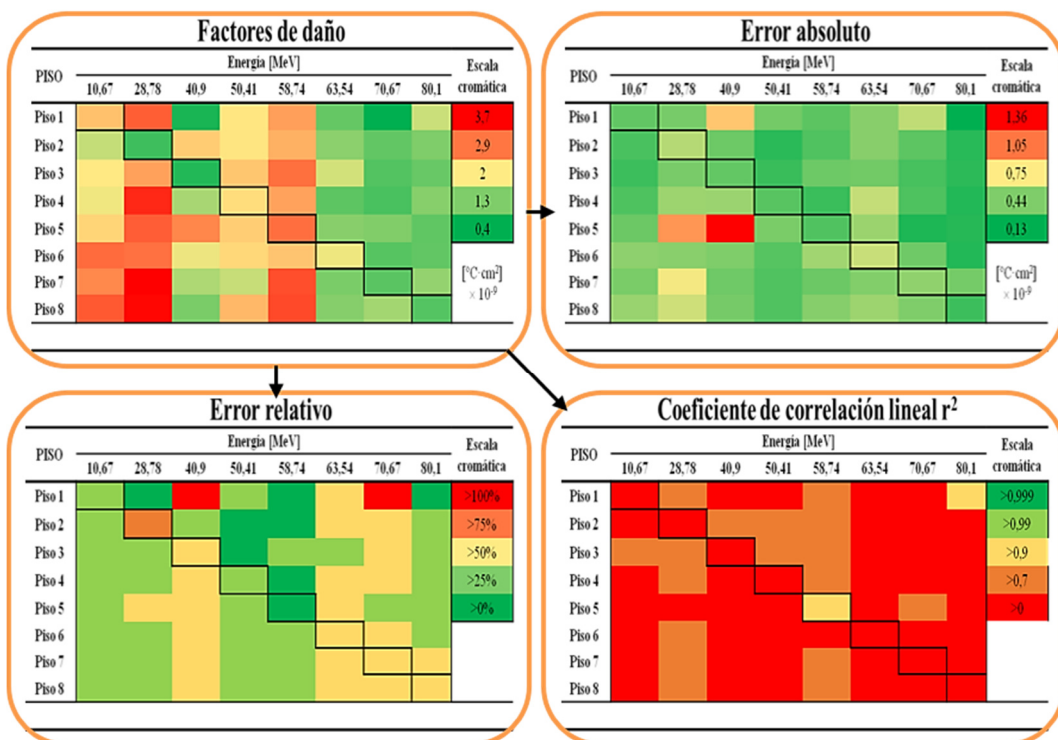


Fig. C-25. Representación cromática de la matriz de factores de daño de los TMP-36 la torre de LED y sus errores y coeficiente de correlación lineal. Resultados numéricos en el Apéndice C



## **Apéndice D**

### **Datos de la calibración de LDT**

*En este cuarto apéndice se muestran las matrices de resultados de la calibración en radiación de LDT.*

## D.1 Resultados numéricos de la calibración de DD

### D.1.1 Factores de daño torre de oscuridad

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	8,74	5,52	4,86	3,83	3,69	3,49	3,30	3,32	100%
Piso 2	0,465	6,36	5,72	4,32	3,73	4,19	3,79	3,69	75%
Piso 3	0,340	0,328	6,23	4,36	3,77	3,83	4,15	4,10	50%
Piso 4	0,350	0,312	0,546	4,80	4,01	4,22	3,69	4,41	25%
Piso 5	0,304	0,316	0,291	0,402	3,77	3,95	3,71	3,85	0%
Piso 6	0,433	0,293	0,317	0,160	0,318	3,40	3,78	3,75	
Piso 7	0,376	0,370	0,325	0,224	0,279	0,380	2,89	3,76	
Piso 8	0,376	0,357	0,304	0,235	0,250	0,201	0,326	3,83	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-26. Factores de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos – Matriz del sistema de la torre de fotodiodos

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,180	0,368	0,136	0,0773	0,133	0,0975	0,118	0,0772	100%
Piso 2	0,0711	0,359	0,119	0,0522	0,108	0,0848	0,0950	0,0711	75%
Piso 3	0,0784	0,0312	0,0975	0,0564	0,0890	0,0751	0,0711	0,0710	50%
Piso 4	0,0619	0,0360	0,0209	0,0616	0,0870	0,0709	0,0797	0,0648	25%
Piso 5	0,0932	0,0295	0,0224	0,0162	0,0621	0,0594	0,0560	0,0591	0%
Piso 6	0,0452	0,0272	0,0296	0,0240	0,0173	0,0488	0,0512	0,0479	
Piso 7	0,0505	0,0292	0,0254	0,0215	0,0205	0,0238	0,0384	0,0431	
Piso 8	0,0486	0,0259	0,0213	0,0180	0,0154	0,0368	0,0362	0,0423	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-27. Errores estadísticos del factor de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos - Torre de fotodiodos

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	2,21%	7,15%	3,00%	2,16%	3,83%	2,98%	3,81%	2,47%	>100%
Piso 2	17,2%	6,33%	2,32%	1,35%	3,23%	2,24%	2,78%	2,13%	>75%
Piso 3	27,2%	11,2%	1,82%	1,50%	2,73%	2,27%	1,97%	1,99%	>30%
Piso 4	22,0%	14,2%	4,67%	1,56%	2,62%	2,03%	2,60%	1,76%	>15%
Piso 5	40,1%	12,0%	9,85%	5,14%	2,09%	1,90%	1,89%	1,92%	>0%
Piso 6	14,4%	12,7%	12,6%	20,1%	7,20%	1,90%	1,78%	1,67%	
Piso 7	19,7%	11,3%	11,1%	13,5%	10,3%	8,71%	1,84%	1,57%	
Piso 8	20,2%	11,0%	10,51%	11,4%	9,09%	26,7%	16,1%	1,58%	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-28. Errores estadísticos porcentuales del factor de daño de la corriente de oscuridad de los fotodiodos - Torre de fotodiodos

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0.995	0.916	0.984	0.994	0.981	0.988	0.979	0.986	>0.999
Piso 2	0.8	0.933	0.990	0.997	0.987	0.993	0.989	0.990	>0.99
Piso 3	0.6	0.8	0.994	0.997	0.990	0.993	0.994	0.991	>0.9
Piso 4	0.7	0.7	0.962	0.997	0.991	0.994	0.990	0.993	>0.7
Piso 5	0.4	0.8	0.89	0.964	0.994	0.995	0.995	0.992	>0
Piso 6	0.8	0.8	0.8	0.6	0.937	0.995	0.995	0.994	
Piso 7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.904	0.995	0.994	
Piso 8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.5	0.7	0.994	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-29. Coeficientes de correlación lineal  $r^2$  – Torre de fotodiodos

## D.1.2 Factores de daño torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	395	197	205	168	191	108	84,8	107	100%
Piso 2	-5,2	82,3	211	143	208	75,3	71,5	83,9	75%
Piso 3	14,6	32,9	100,0	94,6	295	79,4	67,9	103,1	50%
Piso 4	19,6	20,6	76,9	85,5	136,7	49,7	80,4	141	25%
Piso 5	18,1	54,5	95,1	75,4	198,8	33,3	32,4	165	0%
Piso 6	8,5	32,4	-25,1	56,6	116,3	19,4	24,2	97,8	
Piso 7	21,6	38,9	104,1	65,5	143,8	17,7	14,3	70,0	
Piso 8	7,3	29,0	66,8	46,4	102,9	12,2	7,1	103,8	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-30. Factores de daño de la potencia óptica de emisión de los LED – Matriz del sistema de la torre de LED



PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	395	197	205	168	191	108	84,8	107	100%
Piso 2	-5,2	82,3	211	143	208	75,3	71,5	83,9	75%
Piso 3	14,6	32,9	100,0	94,6	295	79,4	67,9	103,1	50%
Piso 4	19,6	20,6	76,9	85,5	136,7	49,7	80,4	141	25%
Piso 5	18,1	54,5	95,1	75,4	198,8	33,3	32,4	165	0%
Piso 6	8,5	32,4	-25,1	56,6	116,3	19,4	24,2	97,8	
Piso 7	21,6	38,9	104,1	65,5	143,8	17,7	14,3	70,0	
Piso 8	7,3	29,0	66,8	46,4	102,9	12,2	7,1	103,8	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-31, Factores de daño de la potencia óptica de emisión de los LED – Matriz del sistema de la torre de LED (con los elementos de mayor valor eliminados de la escala cromática)

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	28,4	27,7	11,4	30,1	34,4	20,1	11,5	7,2	100%
Piso 2	19,5	18,1	8,75	15,2	14,6	8,61	5,85	4,21	75%
Piso 3	12,8	13,2	5,83	10,7	75,4	7,63	5,14	5,30	50%
Piso 4	17,1	8,75	3,56	8,93	5,03	10,0	5,10	7,51	25%
Piso 5	19,5	14,4	6,16	9,39	9,12	7,86	6,21	7,08	0%
Piso 6	13,6	8,13	21,4	7,98	6,25	10,3	5,14	5,35	
Piso 7	14,3	13,9	12,0	7,77	10,3	7,90	5,07	5,64	
Piso 8	13,1	7,12	3,89	7,25	5,94	7,27	5,71	6,56	

Unidades expresadas en  $10^{-18} \text{ A} \cdot \text{cm}^2$

Fig. D-32. Error estadístico del factores de daño de los LED - Torre de LED

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	7,74%	15,1%	5,94%	19,2%	19,2%	19,9%	14,4%	7,16%	>100%
Piso 2	425%	24,6%	4,63%	11,9%	7,81%	12,7%	9,06%	5,54%	>75%
Piso 3	103%	47,0%	6,80%	13,1%	29,6%	11,1%	8,73%	5,90%	>30%
Piso 4	108%	52,1%	5,65%	12,7%	4,45%	24,3%	7,62%	6,36%	>15%
Piso 5	141%	34,1%	8,30%	15,9%	5,81%	29,8%	24,1%	5,36%	>0%
Piso 6	221%	34,2%	115%	18,9%	7,13%	70,1%	27,9%	7,14%	
Piso 7	97,3%	51,5%	16,4%	16,7%	10,0%	62,2%	48,8%	11,0%	
Piso 8	280%	37,5%	8,76%	23,2%	8,50%	87,6%	117%	9,07%	

Fig. D-33. Error estadístico porcentual del factores de daño de los LED – Torre de LED

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,9	0,8	0,9	0,5	0,7	0,7	0,8	0,9	>0.999
Piso 2	0,0	0,6	0,9	0,7	0,9	0,8	0,9	0,9	>0.99
Piso 3	0,0	0,3	0,9	0,7	0,6	0,89	0,9	0,9	>0.9
Piso 4	0,0	0,3	0,9	0,7	0,9	0,6	0,9	0,9	>0.7
Piso 5	0,0	0,4	0,9	0,6	0,9	0,5	0,7	0,9	>0
Piso 6	0,0	0,4	0,1	0,5	0,9	0,1	0,5	0,9	
Piso 7	0,1	0,3	0,7	0,6	0,9	0,2	0,3	0,8	
Piso 8	0,0	0,4	0,9	0,4	0,9	0,1	0,1	0,87	

Fig. D-34. Coeficiente de correlación lineal  $r^2$  del factores de daño de los LED – Torre de LED

### D.1.3 Factores de daño de los TMP-36 de la torre de oscuridad

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	1,10	-0,62	2,67	2,43	1,38	3,27	4,15	3,97	100%
Piso 2	-0,35	3,54	4,38	1,00	2,52	-1,80	-3,41	3,35	75%
Piso 3	0,25	3,42	1,12	0,46	2,72	4,89	2,93	4,79	50%
Piso 4	1,73	2,51	2,76	1,28	7,77	-5,00	-0,04	0,84	25%
Piso 5	-5,57	4,85	1,37	1,96	4,47	-0,07	3,75	0,58	0%
Piso 6	2,70	2,13	1,46	0,31	5,78	-1,85	5,64	2,06	
Piso 7	2,30	0,28	4,75	2,24	6,76	2,03	-11,27	2,91	
Piso 8	-1,66	2,33	2,19	-0,11	3,35	4,63	-1,86	1,70	

Unidades expresadas en  $n^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2$

Fig. D-35. Factores de daño de la medida de temperatura con el TMP36 - Torre de oscuridad

	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	1,57	2,65	1,09	0,851	0,843	2,35	2,28	1,78	100%
Piso 2	1,84	1,47	1,31	1,26	2,61	3,76	3,41	2,51	75%
Piso 3	1,67	1,75	1,43	1,09	1,53	2,06	2,37	2,86	50%
Piso 4	1,42	1,70	0,768	1,17	3,41	2,79	3,88	2,80	25%
Piso 5	4,53	5,15	1,56	0,851	1,88	2,30	3,97	2,31	0%
Piso 6	1,28	2,93	1,51	2,96	2,80	3,53	3,07	2,68	
Piso 7	1,27	2,21	1,42	2,95	4,29	1,61	3,75	2,96	
Piso 8	2,37	2,72	2,00	1,76	1,90	3,14	2,05	2,95	

Unidades expresadas en  $n^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2$

Fig. D-36. Error del factores de daño de la medida de temperatura - Torre de oscuridad

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	154%	458%	43,8%	37,4%	65,4%	76,5%	58,5%	47,7%	>100%
Piso 2	600%	46,5%	33,4%	140%	115%	232%	111%	82,8%	>75%
Piso 3	791%	60,0%	149%	275%	65,2%	48,8%	93,5%	68,6%	>50%
Piso 4	102%	83,3%	33,9%	110%	53,1%	67,4%	11179%	399%	>25%
Piso 5	106%	137%	146%	55,3%	53,4%	3901%	133%	501%	>0%
Piso 6	65,7%	188%	139%	1282%	64,3%	253%	71,5%	170%	
Piso 7	81,2%	1119%	42,7%	186%	88,6%	110%	45,9%	139%	
Piso 8	222,1%	178,2%	137,5%	2336%	83,3%	99,5%	159,8%	248%	

Fig. D-37. Error estadístico porcentual de la medida de temperatura - Torre oscuridad

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,05	0,00	0,25	0,37	0,17	0,12	0,18	0,18	>0.999
Piso 2	0,00	0,24	0,38	0,04	0,07	0,02	0,06	0,07	>0.99
Piso 3	0,00	0,17	0,03	0,01	0,20	0,29	0,09	0,11	>0.9
Piso 4	0,13	0,11	0,42	0,08	0,29	0,19	0,00	0,00	>0.7
Piso 5	0,13	0,05	0,04	0,27	0,30	0,00	0,06	0,00	>0
Piso 6	0,31	0,03	0,05	0,00	0,25	0,02	0,18	0,02	
Piso 7	0,25	0,00	0,38	0,04	0,16	0,10	0,38	0,04	
Piso 8	0,05	0,04	0,06	0,00	0,19	0,13	0,05	0,01	

Fig. D-38. Coeficiente de correlación lineal  $r^2$  del ajuste del factores de daño de la temperatura - Torre de oscuridad

#### D.1.4 Factores de daño de los TMP-36 de la torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	2,36	3,04	0,597	2,10	2,59	1,08	0,436	1,72	100%
Piso 2	1,70	0,836	2,28	2,11	2,47	1,33	1,06	1,25	75%
Piso 3	2,08	2,58	0,663	2,32	2,91	1,79	0,970	1,10	50%
Piso 4	1,98	3,41	1,51	2,17	2,57	1,04	0,912	1,29	25%
Piso 5	2,21	3,04	2,76	2,27	2,93	1,30	1,26	1,05	0%
Piso 6	2,95	2,91	1,95	2,19	2,33	1,95	0,989	1,06	
Piso 7	2,75	3,68	1,54	1,70	3,15	1,21	1,01	1,38	
Piso 8	3,07	3,65	1,21	2,42	3,19	1,29	1,48	0,97	

Unidades expresadas en  $n^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2$ 

Fig. D-39. Factores de daño de la medida de temperatura con el TMP36 - Torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,37	0,42	0,84	0,411	0,355	0,46	0,59	0,13	100%
Piso 2	0,31	0,57	0,39	0,24	0,33	0,46	0,36	0,23	75%
Piso 3	0,28	0,42	0,37	0,27	0,40	0,41	0,30	0,24	50%
Piso 4	0,32	0,51	0,505	0,34	0,27	0,61	0,32	0,22	25%
Piso 5	0,39	0,97	1,36	0,429	0,33	0,51	0,21	0,23	0%
Piso 6	0,48	0,46	0,44	0,34	0,52	0,62	0,40	0,22	
Piso 7	0,42	0,72	0,40	0,33	0,39	0,45	0,48	0,41	
Piso 8	0,50	0,63	0,42	0,33	0,46	0,51	0,44	0,28	

Unidades expresadas en n°C·cm<sup>2</sup>

Fig. D-40. Error del factores de daño de la medida de temperatura - Torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	16,9%	14,8%	151%	20,9%	14,6%	45,7%	145%	8,3%	>100%
Piso 2	20,8%	76,2%	19,3%	12,7%	14,7%	38,6%	37,6%	20,4%	>75%
Piso 3	16,0%	19,2%	65,6%	13,7%	15,7%	26,4%	36,2%	25,2%	>50%
Piso 4	20%	18,4%	40,9%	19,3%	12,9%	70,4%	42,7%	20,1%	>25%
Piso 5	23,1%	41,1%	63,1%	24,0%	14,2%	49,2%	20,7%	26,9%	>0%
Piso 6	22,3%	21,8%	30,4%	20,9%	29,8%	41,7%	53,2%	27,0%	
Piso 7	22,7%	28,0%	36,9%	27,0%	17,4%	51,1%	65,4%	41,2%	
Piso 8	25,3%	26,3%	51,8%	20,1%	21,0%	58,2%	43,2%	41,6%	

Fig. D-41 Error estadístico porcentual de la medida de temperatura - Torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala cromática
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,6	0,8	0,0	0,5	0,8	0,3	0,0	0,9	>0.999
Piso 2	0,6	0,2	0,7	0,8	0,8	0,4	0,4	0,7	>0.99
Piso 3	0,7	0,8	0,2	0,8	0,8	0,6	0,5	0,6	>0.9
Piso 4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,7	>0.7
Piso 5	0,6	0,5	0,2	0,5	0,9	0,4	0,8	0,6	>0
Piso 6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,3	0,6	
Piso 7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,8	0,4	0,3	0,4	
Piso 8	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,4	

Fig. D-42 Coeficiente de correlación lineal  $r^2$  del ajuste del factores de daño de la temperatura - Torre de luz

## D.2 Resultados numéricos de la calibración de la respuesta al flujo

### D.2.1 Sensibilidad flujo de la corriente de los fotodiodos de la torre de oscuridad

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	129,34	65,58	55,85	50,37	28,11	33,46	31,67	29,92	100%
Piso 2	0,5370	68,99	63,65	53,00	35,66	38,21	36,69	33,27	75%
Piso 3	6,07E-03	0,907	94,278	60,50	38,60	35,16	39,19	36,81	50%
Piso 4	7,45E-03	0,126	3,554	29,75	41,02	37,66	34,82	43,42	25%
Piso 5	1,24E-02	0,119	0,220	2,516	44,33	42,54	35,93	37,00	0%
Piso 6	8,02E-03	0,139	6,50E-03	0,323	2,007	46,44	42,70	34,32	
Piso 7	9,33E-03	0,144	4,58E-03	1,37E-02	0,438	1,996	41,85	36,74	
Piso 8	7,91E-03	0,154	-1,36E-03	4,06E-03	6,42E-02	0,479	1,701	48,36	

Unidades expresadas en  $\text{fA} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2$ 

Fig. D-43 Sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 2

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	3,422	7,148	2,002	1,295	0,579	0,542	1,608	1,034	100%
Piso 2	7,00E-03	7,141	2,126	1,390	0,123	0,644	1,795	0,771	75%
Piso 3	5,44E-04	0,260	3,342	1,574	0,123	0,577	1,933	1,020	50%
Piso 4	5,44E-04	0,280	5,68E-02	5,336	0,230	0,588	1,648	0,712	25%
Piso 5	7,26E-04	0,270	5,90E-03	0,116	0,747	0,737	1,653	1,045	0%
Piso 6	7,00E-04	0,312	1,10E-03	2,00E-02	4,70E-02	0,851	1,908	0,971	
Piso 7	7,56E-04	0,330	1,20E-03	2,23E-03	1,64E-02	3,64E-02	1,776	0,910	
Piso 8	8,71E-04	0,361	6,29E-04	1,82E-03	5,48E-03	1,78E-02	4,01E-02	0,929	

Unidades expresadas en  $\text{fA} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2$ 

Fig. D-44 Error estadístico de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 2

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	2,6%	10,90%	3,6%	2,57%	2,06%	1,62%	5,08%	3,46%	>100%
Piso 2	1,30%	10,35%	3,34%	2,62%	0,35%	1,69%	4,89%	2,32%	>75%
Piso 3	8,96%	28,6%	3,5%	2,60%	0,32%	1,64%	4,93%	2,77%	>30%
Piso 4	7,30%	222,5%	1,60%	17,9%	0,56%	1,56%	4,73%	1,64%	>15%
Piso 5	5,86%	227,4%	2,69%	4,60%	1,68%	1,73%	4,60%	2,82%	>0%
Piso 6	8,72%	224,4%	17,0%	6,19%	2,34%	1,83%	4,47%	2,83%	
Piso 7	8,10%	229,3%	26,2%	16,2%	3,75%	1,82%	4,24%	2,48%	
Piso 8	11,0%	234,8%	46,4%	44,9%	8,54%	3,71%	2,36%	1,92%	

Fig. D-45 Error estadístico porcentual de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 2

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,99	0,955	1,0	0,991	0,98	0,994	0,96	0,99	>0.999
Piso 2	0,997	0,959	1,0	0,991	0,9995	0,994	0,96	0,995	>0.99
Piso 3	0,89	0,5	1,0	0,991	0,9996	0,994	0,96	0,993	>0.9
Piso 4	0,93	0,02	0,994	0,6	0,999	0,994	0,97	0,998	>0.7
Piso 5	0,95	0,02	0,98	0,96	0,99	0,993	0,97	0,993	>0
Piso 6	0,90	0,02	0,6	0,93	0,98	0,992	0,97	0,993	
Piso 7	0,91	0,02	0,4	0,7	0,95	0,991	0,97	0,995	
Piso 8	0,85	0,02	0,2	0,2	0,78	0,96	0,99	0,997	

Fig. D-46. Coeficiente r2 del ajuste lineal de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos – Torre 2

## D.2.2 Sensibilidad al flujo de los fotodiodos de la torre de luz

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	179,0	75,63	47,15	42,68	37,06	33,95	30,30	29,66	100%
Piso 2	0,4100	87,93	52,89	45,33	37,28	40,16	35,96	32,55	75%
Piso 3	2,05E-02	0,7382	79,24	51,86	39,25	36,78	38,60	36,32	50%
Piso 4	2,75E-02	6,96E-03	2,876	73,18	39,74	39,45	34,60	43,78	25%
Piso 5	1,99E-02	7,26E-03	0,3196	1,993	52,45	46,45	36,74	36,68	0%
Piso 6	3,87E-02	2,05E-02	6,24E-02	0,2723	1,562	52,59	44,13	35,31	
Piso 7	-1,56E-02	7,49E-04	7,08E-02	-7,91E-02	0,4738	1,587	43,09	37,87	
Piso 8	1,98E-02	2,41E-03	9,51E-02	-7,85E-02	2,00E-01	0,4604	1,186	49,17	

Unidades expresadas en fA·s·cm<sup>2</sup>

Fig. D-47. Sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	1,02	1,50	0,912	1,59	0,130	0,150	0,116	0,150	100%
Piso 2	0,0164	1,55	0,959	1,63	0,143	0,125	0,127	0,179	75%
Piso 3	0,0147	0,0170	1,35	1,81	0,215	0,116	0,119	0,185	50%
Piso 4	0,0235	0,0087	0,0470	2,50	2,49	0,118	0,129	0,208	25%
Piso 5	0,0142	0,0115	0,0199	0,0805	3,15	0,125	0,143	0,161	0%
Piso 6	0,0120	0,0115	0,0180	0,0285	0,0934	0,215	0,207	0,126	
Piso 7	0,0120	0,0073	0,0150	0,0280	0,0579	0,0514	1,29	0,178	
Piso 8	0,0161	0,0090	0,0151	0,0183	0,0527	0,0395	0,115	0,212	

Unidades expresadas en fA·s·cm<sup>2</sup>

Fig. D-48. Error estadístico de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,57%	2,0%	1,9%	3,7%	0,35%	0,44%	0,38%	0,51%	>100%
Piso 2	4,0%	1,8%	1,8%	3,6%	0,38%	0,31%	0,35%	0,55%	>75%
Piso 3	72%	2,3%	1,7%	3,5%	0,55%	0,32%	0,31%	0,51%	>30%
Piso 4	85%	125%	1,63%	3,4%	6,27%	0,30%	0,37%	0,48%	>15%
Piso 5	71%	158%	6,2%	4,0%	6,0%	0,27%	0,39%	0,44%	>0%
Piso 6	31%	56%	29%	10,5%	6,0%	0,41%	0,47%	0,36%	
Piso 7	77%	971%	21%	35%	12,2%	3,2%	3,0%	0,47%	
Piso 8	81%	375%	16%	23%	26%	8,6%	9,7%	0,43%	

Fig. D-49 Error estadístico porcentual de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos - Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10,67	28,78	40,9	50,41	58,74	63,54	70,67	80,1	
Piso 1	0,9995	0,995	0,990	0,97	0,9994	0,9994	0,9996	0,9997	0,999
Piso 2	0,97	0,995	0,991	0,97	0,9993	0,9997	0,9996	0,9996	0,99
Piso 3	0,09	0,991	0,991	0,97	0,998	0,9996	0,9997	0,9996	0,9
Piso 4	0,06	0,03	0,991	0,97	0,81	0,9996	0,9995	0,9996	0,7
Piso 5	0,07	0,02	0,87	0,95	0,81	0,9997	0,9994	0,9997	0
Piso 6	0,3	0,1	0,2	0,71	0,79	0,9992	0,9991	0,9998	
Piso 7	0,05	0,0004	0,3	0,2	0,5	0,95	0,96	0,9995	
Piso 8	0,04	0,003	0,4	0,3	0,1	0,7	0,7	0,9996	

Fig. D-50 Coeficiente r2 del ajuste lineal de la sensibilidad al flujo de los fotodiodos – Torre 1

### D.2.3 Sensibilidad al flujo de la señal de los TMP36 de la torre de fotodiodos

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	1069	1264	2616	2638	6958	4071	3725	1835	100%
Piso 2	220	176	523	576	1250	640	770	501	75%
Piso 3	29	100	246	179	522	450	405	209	50%
Piso 4	110	58.2	251	370	346	453	394	365	25%
Piso 5	-82.4	31.6	52.3	134	214	427	432	325	0%
Piso 6	87.5	165	44.9	81.5	405	473.1	488	124	
Piso 7	136	58.7	44.4	130	362	383	599	215	
Piso 8	-40.8	11.6	72.8	98.9	591	181	434	222	

Unidades expresadas en n°C·s·cm<sup>2</sup>

Fig. D-51 Sensibilidad al flujo de la medida de temperatura a través del TMP 36 - Torre 2

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	61.1	360	278	366	262	216	223	435	100%
Piso 2	63.0	77.9	43.7	77.9	156	90.8	71.7	33.2	75%
Piso 3	55.2	41.3	44.0	43.9	90.3	44.3	37.4	34.6	50%
Piso 4	53.1	39.4	53.8	42.7	87.6	71.2	66.1	41.3	25%
Piso 5	31.2	23.8	36.0	45.1	127	57.6	52.9	48.1	0%
Piso 6	47.7	61.5	43.4	80.8	114	39.4	68.5	81.0	
Piso 7	63.5	47.9	45.4	59.7	121	73.0	39.6	128	
Piso 8	67.9	43.0	33.3	57.8	153	69.4	55.6	97.4	

Unidades expresadas en n°C·s·cm<sup>2</sup>

Fig. D-52 Error estadístico de la sensibilidad al flujo de temperatura – Torre 2

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	5.72%	28.5%	10.6%	13.9%	3.77%	5.31%	5.99%	23.7%	>100%
Piso 2	28.6%	44.3%	8.34%	13.5%	12.5%	14.2%	9.31%	6.63%	>75%
Piso 3	191%	41.5%	17.8%	24.5%	17.3%	9.85%	9.23%	16.6%	>30%
Piso 4	48.3%	67.7%	21.4%	11.5%	25.3%	15.7%	16.8%	11.3%	>15%
Piso 5	37.8%	75.4%	68.8%	33.6%	59.4%	13.5%	12.2%	14.8%	>0%
Piso 6	54.5%	37.3%	96.6%	99.2%	28.2%	8.33%	14.0%	65.4%	
Piso 7	46.5%	81.6%	102%	45.9%	33.3%	19.1%	6.61%	59.6%	
Piso 8	166%	371%	45.7%	58.4%	25.8%	38.5%	12.8%	43.9%	

Fig. D-53 Error estadístico porcentual de la sensibilidad al flujo de la temperatura – Torre 2



PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	0.96	0.6	0.80	0.74	0.95	0.93	0.94	0.6	0.999
Piso 2	0.5	0.4	0.87	0.75	0.6	0.6	0.86	0.96	0.99
Piso 3	0.02	0.4	0.6	0.5	0.5	0.79	0.86	0.78	0.9
Piso 4	0.2	0.2	0.5	0.81	0.3	0.6	0.7	0.89	0.7
Piso 5	0.3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.7	0.78	0.82	0
Piso 6	0.2	0.4	0.0	0.1	0.3	0.84	0.73	0.2	
Piso 7	0.2	0.1	0.0	0.2	0.2	0.5	0.92	0.2	
Piso 8	0.03	0.01	0.2	0.1	0.3	0.2	0.76	0.3	

Fig. D-54 Coeficiente r2 del ajuste lineal de la sensibilidad al flujo de la medida de temperatura a través del TMP 36– Torre 2

### D.2.4 Sensibilidad al flujo de la señal de los TMP36 de la torre de LED

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	-6	30	32	-60	226	-21	138	115	100%
Piso 2	4	33	6	-144	-11	30	13	-13	75%
Piso 3	-2	0.3	-37	24	170	163	128	-18	50%
Piso 4	0.3	26	67	-4.5	-62	52	-96	36	25%
Piso 5	41	39	-78	10	-74	30	-28	101	0%
Piso 6	5	5	126	4	-134	18	-19	22	
Piso 7	7	-6	67	-34	-28	-14	99	-190	
Piso 8	43	11	43	-103	171	-118	-49	-12	

Unidades expresadas en  $n^{\circ}C \cdot s \cdot cm^2$ 

Fig. D-55 Sensibilidad al flujo de la medida de temperatura a través del TMP 36 - Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	30	19	27	34	91	46	47	69	100%
Piso 2	28	25	33	32.4	111	39	52	50	75%
Piso 3	6	18	35	13	67	53	35.3	63	50%
Piso 4	35	14	37	27	83	39	49	50	25%
Piso 5	26	26	43	46	85	36	46	55	0%
Piso 6	42	17	34.3	33	65	54	49	60	
Piso 7	34	22	36	39	90	24	42	31.3	
Piso 8	26	21	32	47	104	51	29	66	

Unidades expresadas en  $n^{\circ}C \cdot s \cdot cm^2$ 

Fig. D-56 Error estadístico de la sensibilidad al flujo de la temperatura – Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	492%	63%	85%	57%	40%	220%	34%	60%	>100%
Piso 2	793%	78%	543%	22.5%	1017%	127%	391%	400%	>75%
Piso 3	268%	5717%	95%	54%	39%	32%	27.5%	351%	>30%
Piso 4	13384%	53%	55%	605%	133%	76%	51%	137%	>15%
Piso 5	64%	65%	56%	473%	115%	121%	168%	54%	>0%
Piso 6	827%	346%	27.2%	800%	48%	298%	254%	269%	
Piso 7	478%	380%	53%	113%	327%	180%	43%	16.5%	
Piso 8	61%	187%	75%	45%	61%	43%	59%	545%	

Fig. D-57 Error estadístico porcentual de la sensibilidad al flujo de temperatura – Torre 1

PISO	Energía [MeV]								Escala de color
	10.67	28.78	40.9	50.41	58.74	63.54	70.67	80.1	
Piso 1	0.002	0.2	0.05	0.11	0.12	0.01	0.25	0.2	0.999
Piso 2	0.001	0.1	0.00	0.43	0.0	0.0	0.00	0.01	0.99
Piso 3	0.01	0.0	0.0	0.1	0.1	0.20	0.30	0.01	0.9
Piso 4	$3 \cdot 10^{-6}$	0.2	0.1	0.00	0.0	0.0	0.1	0.04	0.7
Piso 5	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.01	0.18	0
Piso 6	0.0005	0.004	0.2	0.0	0.1	0.00	0.00	0.0	
Piso 7	0.001	0.003	0.1	0.0	0.0	0.0	0.11	0.7	
Piso 8	0.07	0.01	0.0	0.1	0.0	0.1	0.06	0.0016	

Fig. D-58 Coeficiente r2 del ajuste lineal de la sensibilidad al flujo de la medida de temperatura a través del TMP 36– Torre 1



# Índice de Figuras

---

FIG. 1-1. ALTURA DE LA ISS [WWW_HEA]. EN EL EJE X SE REPRESENTA LA FECHA, Y EN EL EJE Y LA ALTURA EXPRESADA EN KM.....	4
FIG. 1-2. RESUMEN DEL ENTORNO DE RADIACIÓN Y TÉRMICO EN LAS MISIONES DE EXPLORACIÓN PLANTARÍA DE ALGUNOS ASTROS DEL SISTEMA SOLAR .....	5
FIG. 1-3. ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA SEGUIDA POR UNA PARTÍCULA CARGADA EN EL ENTORNO TERRESTRE [Hes68] .....	8
FIG. 1-4. DIBUJO DE LOS CINTURONES DE VAN ALLEN.....	8
FIG. 1-5. FLUJO INTEGRAL DE ELECTRONES DE > 1 MeV [SPENVIS] .....	8
FIG. 1-6. FLUJO INTEGRAL DE PROTONES > 10 MeV [SPENVIS].....	8
FIG. 1-7. DEFORMACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE POR ACCIÓN DEL VIENTO SOLAR.....	9
FIG. 1-8. EFECTO DE LA AAS SOBRE EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE EN UNA ÓRBITA LEO DE 650 KM [Mic10] .....	9
FIG. 1-9. REPRESENTACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DEL ANILLO INTERIOR SOBRE LA AAS.....	9
FIG. 1-10. FLUJO INTEGRAL DE $e^-$ DE > 1 MeV [SPENVIS] .....	10
FIG. 1-11. EFECTO DE LA AAS SOBRE EL FLUJO INTEGRAL DE $p^+$ > 10 MeV EN UNA ÓRBITA DE 500 KM DE ALTITUD [SPENVIS].....	10
FIG. 1-12. LET VS. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN.....	22
FIG. 1-13. NIEL VS. ENERGÍA DE DIFERENTES PARTÍCULAS EN SILICIO [Poi09] .....	24
FIG. 1-14. NIEL VS. ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS EN GAAs [Poi09] .....	24
FIG. 1-15. COMPARATIVA DEL NIEL Y DEL LET DE PROTONES EN SILICIO [MAR99] .....	24
FIG. 1-16. COMPARATIVA DEL NIEL Y DEL LET DE PROTONES EN GAAs [Mes97].....	24
FIG. 1-17. NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA ( <i>TECHNOLOGY READINESS LEVEL</i> – TRL).....	27
FIG. 1-18. NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA ( <i>TECHNOLOGY READINESS LEVEL</i> – TRL).....	28
FIG. 2-1. REPRESENTACIÓN DE $M$ CANALES. ....	33
FIG. 2-2. SENSORES APILADOS .....	33
FIG. 2-3. ENERGÍA NECESARIA DE LOS PROTONES INCIDENTES PARA ALCANZAR EL PRIMER PISO, EL TERCERO Y EL ÚLTIMO. LOS PISOS MARCADOS EN ROJO SON AQUELLOS A LOS QUE LLEGAN PROTONES.....	34
FIG. 2-4. EFECTO DEL BLINDAJE SOBRE EL ESPECTRO ENERGÉTICO DE PARTÍCULAS INCIDENTES CON ENERGÍA SUFICIENTE PARA ALCANZAR EL PENÚLTIMO PISO.....	34
FIG. 2-5. SENSOR APANTALLADO CON UN BLINDAJE HOMOGÉNEO ESFÉRICO. ....	37
FIG. 2-6. REPRESENTACIÓN DE LOS $M$ SENSORES Y DE SUS BLINDAJES. ....	38
FIG. 2-7. REPRESENTACIÓN DE UNA TORRE DE FOTODIODOS RODEADA DE UN BLINDAJE LATERAL Y TRASERO. ....	42
FIG. 2-8. DIAGRAMA DE LA DEPENDENCIA DEL BLINDAJE LATERAL CON EL ÁNGULO.....	42
FIG. 2-9. TRES APILAMIENTOS DE FOTODIODOS USADOS PARA LA VERIFICACIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO: LDT-9-0-T_1, LDT-9-0-T_2 (2) Y LDT-9-0-F_3 [TABLA 2-1.] .....	43

FIG. 2-10. FIRMAS ENERGÉTICAS DE LOS PROTONES DE $\sim 40$ MeV SOBRE EL APILAMIENTO 1 (IRRADIACIÓN TRASERA) Y EL APILAMIENTO 2 (IRRADIACIÓN FRONTAL) OBTENIDAS EN EL PASO 2 DE LA IRRADIACIÓN #1LDT .....	46
FIG. 2-11. FIRMAS ENERGÉTICAS DE LOS APILAMIENTOS IRRADIADOS EN EL ENSAYO #1LDT PARA LA VERIFICACIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	47
FIG. 2-12. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-9-0.5-F-2 ENSAYADO DURANTE LA IRRADIACIÓN #1LDT .....	48
FIG. 2-13. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-9-0.5-T-1 ENSAYADO DURANTE LA IRRADIACIÓN #1LDT .....	48
FIG. 2-14. CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL PISO 2 DE LA “LDT-9-0.5-F_2” DURANTE LA IRRADIACIÓN CON 20 MeV EN LA IRRADIACIÓN #2LDT. LA LÍNEA AZUL PUNTEADA ES EL AJUSTE LINEAL CUYA PENDIENTE ES EL FACTOR DE DAÑO.....	50
FIG. 2-15. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-9-0.5-F_2 (TORRE 2) OBTENIDA DURANTE LA IRRADIACIÓN #2LDT .....	51
FIG. 2-16. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-9-0.5-T_1 (TORRE 1) OBTENIDA DURANTE LA IRRADIACIÓN #2LDT .....	51
FIG. 2-17. DISCREPANCIA ENTRE LOS FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO DE IRRADIACIÓN FRONTAL Y EL DE IRRADIACIÓN TRASERA [IRRADIACIÓN CON $P^+$ DE $\sim 25$ MeV] .....	52
FIG. 2-18. DISCREPANCIA DEL FACTORES DE DAÑO ENTRE EL APILAMIENTO IRRADIACIÓN FRONTAL Y EN IRRADIACIÓN TRASERA [IRRADIACIÓN CON $P^+$ DE $\sim 30$ MeV] .....	53
FIG. 2-19. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LAS MATRICES DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-6-0-T_1 (TORRE 1) Y LDT-6-0-T_2 (TORRE 2) OBTENIDA DURANTE LA IRRADIACIÓN #2LDT.....	54
FIG. 2-20. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DEL APILAMIENTO LDT-6-0-F_3 (TORRE 3) OBTENIDA DURANTE LA IRRADIACIÓN #2LDT.....	54
FIG. 2-21. ESQUEMA DE LAS ENERGÍAS UMBRALES EN INCIDENCIA FRONTAL, LATERAL Y A UNA DE LOS ÁNGULOS LATERALES. EL COLOR ROJO SIGNIFICA MÁXIMO DAÑO PRODUCIDO.....	57
FIG. 2-22. RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LOS FACTORES DE DAÑO FRONTALES Y TRASEROS .....	60
FIG. 2-23. REPRESENTACIÓN DE LAS ENERGÍAS FRONTALES Y TRASERAS EN UN APILAMIENTO CON BLINDAJE EXTRA EN LA PARTE DE ATRÁS. ....	61
FIG. 2-24. ENERGÍA UMBRAL FRONTAL (AZUL) Y TRASERA (ROJO) DE LDT .....	63
FIG. 2-25. ENERGÍA UMBRAL DE LAS 12 DIRECCIONES LATERALES SELECCIONADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA. LA DIRECCIÓN #1 Y #5 NO APARECEN POR TRATARSE DE LA FRONTAL Y TRASERA .....	63
FIG. 3-1. PISCINA DEL NAYADE (CIEMAT) EN DONDE SE APRECIAN LAS GUÍAS DE ALINEAMIENTO Y EL COLOR AZUL DE LA RADIACIÓN CHERENKOV ([Che34] y [TAM37]) PRODUCIDA POR LA RADIACIÓN GAMMA (IZQUIERDA); CILINDRO ESTANCO USADO PARA INTRODUCIR EL SISTEMA A IRRADIAR DENTRO DE LA PISCINA (DERECHA) .....	72
FIG. 3-2. DATOS DE CONTACTO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA (USC) DE ESPAÑA. FIGURA OBTENIDA DE [RADECS04].....	73

FIG. 3-3. DE IZQUIERDA A DERECHA SE MUESTRAN LA SALIDA DEL CAÑÓN DE PROTONES CON LA TARIETA DE FOTODIODOS Y LED A IRRADIAR SITUADA EN EL PUNTO DE IRRADIACIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL: LIF-USCL (BÉLGICA), RADEF (FINLANDIA) Y PIF-PSI (SUIZA) .....	74
FIG. 3-4. REGISTRO OBTENIDO DURANTE EL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL HAZ DE PROTONES EN LIF-USCL (BÉLGICA) DURANTE UNA DE LAS IRRADIACIONES .....	74
FIG. 3-5. DATOS DE CONTACTO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN DE LA <i>UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAINS</i> (UCL) SITUADA EN BÉLGICA. FIGURA OBTENIDA DE [RADECS04] .....	75
FIG. 3-6. DATOS DE CONTACTO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN DE LA <i>UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ</i> EN FINLANDIA. FIGURA OBTENIDA DE [RADECS04] .....	75
FIG. 3-7. DATOS DE CONTACTO DEL <i>PAUL SCHERRER INSTITUT</i> , VILGEN, SUIZA. FIGURA OBTENIDA DE [RADECS04] .....	75
FIG. 3-8. EMISOR DE LUZ VCSEL EMPLEADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD DE LOS FOTODIODOS DURANTE LA IRRADIACIÓN. SE MUESTRA ALOJADO EN LA PIEZA DE ALUMINIO QUE HACE A LA VEZ DE ACOPLE CON EL BANCO OPTOMECAÁNICO Y DE APANTALLAMIENTO EXTRA PARA LA RADIACIÓN (IZQUIERDA); REPRESENTACIÓN TEMPORAL DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN DEL ENSAYO ALTERNANDO ENTRE LOS NIVELES 0, 1, 2 Y 3 SUCESIVAMENTE (DERECHA) .....	77
FIG. 3-9. ESQUEMA DE LA VISIÓN LATERAL DEL SISTEMA OPTO-MECÁNICO SEÑALANDO LA POSICIÓN DE LA FUENTE GAMMA, LOS BLINDAJES, EL EMISOR VCSEL DE LUZ, EL ESPEJO, LOS FOTODIODOS IRRADIADOS Y LOS DE REFERENCIA. LAS ZONAS BLANCAS SEÑALAN LOS VOLÚMENES QUE IDEALMENTE ESTÁN LIBRES DE RADIACIÓN (IZQUIERDA). ESQUEMA DEL SISTEMA DENTRO DEL CILINDRO DE 30 CM VISTO DESDE ARRIBA (DERECHA) .....	79
FIG. 3-10. FOTOGRAFÍA DE LA ESTRUCTURA DESARROLLADA PARA LAS IRRADIACIONES CON GAMMA EL CIEMAT .....	79
FIG. 3-11. ULTIMAS COMPROBACIONES DE LA ELECTRÓNICA DE PROXIMIDAD ANTES DE CERRAR .....	81
FIG. 3-12. INSTANTE EN EL QUE EL CILINDRO ES INTRODUCIDO EN LA PISCINA .....	81
FIG. 3-13. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL COLOCADO EN LA SUPERFICIE JUSTO AL LADO DE LA PISCINA DE IRRADIACIÓN .....	81
FIG. 3-14. UNA DE LAS TARJETAS DE FOTODIODOS PARA SU IRRADIACIÓN CON RAYOS GAMMA .....	81
FIG. 3-15. VISTA DELANTERA Y TRASERA DE UNA DE LAS TARJETAS DE IRRADIACIÓN .....	84
FIG. 3-16. PARTES DE LA TARJETA DE IRRADIACIÓN Y DEL SISTEMA DE MEDIDA. SE APRECIAN LOS EMISORES Y DETECTORES EN EL INTERIOR DE LOS AGUJEROS ESPACIADOR DE DELRIN. ....	85
FIG. 3-17. APRIETE DE LOS TORNILLOS DE FIJACIÓN .....	86
FIG. 3-18. SITUACIÓN FINAL DE LA TARJETA DE MEDIDA Y DE IRRADIACIÓN .....	86
FIG. 3-19. CAPTURA DE PANTALLA DEL EGSE DURANTE UNA CARACTERIZACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD .....	87
FIG. 3-20. SALA DE CARACTERIZACIÓN MONTADA EN EL PIF (PSI, SUIZA) DURANTE UNA IRRADIACIÓN EN 2006.....	88
FIG. 3-21. TARJETA IRRADIADA DETRÁS DE UN APANTALLAMIENTO DE LADRILLOS DE PLOMO MIENTRAS SE VERIFICA SU RADIOACTIVIDAD CON UN GEIGER EN EL PSI .....	89
FIG. 3-22. PARTE FRONTAL Y TRASERA DE LAS TARJETAS DE IRRADIACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL FLUJO EN LOS DAÑOS POR DESPLAZAMIENTO .....	90

FIG. 3-23. LOS DOS PRIMEROS MODELOS DE APILAMIENTOS DE FOTODIODOS USADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. LOS MODELOS MOSTRADOS SON LOS DENOMINADOS LDT-9-0.5-F_2 (MARCADO CON UN 2) Y LDT-9-0.5-T_1 (MARCADO CON UN 1) DESCRITOS EN LA TABLA 2-1 .....	93
FIG. 3-24. EGSE DE ADQUISICIÓN EN EL QUE SE SEÑALAN LOS INDICADORES CON LOS NOMBRES DE LUGARES DE LAS NOVELAS DE TOLKIEN .....	94
FIG. 3-25. TARJETA DE IRRADIACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA DEPENDENCIA DEL FACTOR DE DAÑO CON LA ENERGÍA DE LOS PROTONES .....	95
FIG. 3-26. SALA DE CONTROL DEL PIF DEL PSI DURANTE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO FM EN 2008 .....	96
FIG. 3-27. PANTALLAZO DE LA INTERFAZ DE USUARIO DEL EGSE DE CONTROL DE LDT .....	98
FIG. 3-28. VISTA LATERAL DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN. EN AZUL SE MARCA LA ZONA POR DONDE LOS P <sup>+</sup> INCIDEN .....	99
FIG. 3-29. FOTOGRAFÍA DE LA MÁSCARA DE METACRILATO, SE HAN RESALTADO LOS BORDES EN AMARILLO PARA FACILITAR SU IDENTIFICACIÓN. SE SEÑALA ADEMÁS EL ORIFICIO RECTANGULAR ENFRENTA DEL ÁREA SENSORA DE LDT.....	100
FIG. 3-30. FOTOGRAFÍAS DE LOS ELEMENTOS QUE FIJAN Y ALINEAN LA MÁSCARA Y LDT CENTRADAS EN EL HAZ DE PROTONES: A) VISTA LATERAL; B) VISTA DESDE ARRIBA; C) VISTA DESDE LA POSICIÓN DE LDT; D) VISTA GENERAL DEL FINAL DEL CAÑÓN CON TODO EL SISTEMA MONTADO Y ALINEADO.....	101
FIG. 3-31. FOTOGRAFÍAS DE LA DISPOSICIÓN DE LDT DURANTE LOS PREPARATIVOS DE ALINEACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN FRONTAL: A) POSICIONANDO LA ESTRUCTURA DE SUJECCIÓN CON LA MÁSCARA DE METACRILATO; B) FIJANDO LA DISTANCIA DE TRABAJO; C) ALINEANDO LDT RESPECTO A SUS MARCAS HORIZONTALES; D) COLOCANDO LDT A LA ALTURA CORRECTA .....	102
FIG. 3-32. LOS EJES DE GIRO HORIZONTAL Y VERTICAL MARCADOS EN ROJO SOBRE UNA REPRESENTACIÓN EN 3D DE LDT.....	103
FIG. 3-33. ESQUEMA DE MONTAJE DE SUJECCIÓN PARA LOS GIROS HORIZONTALES .....	103
FIG. 3-34. ESQUEMA DE MONTAJE DE SUJECCIÓN PARA LOS GIROS VERTICALES.....	103
FIG. 3-35. FOTOGRAFÍAS DE LDT SITUADAS SOBRE EL ROTADOR PARA REALIZAR LOS GIROS HORIZONTALES. DETERMINACIÓN DE LAS ENERGÍAS UMBRALES LATERALES DEL QM EN 2010.....	104
FIG. 3-36. FOTOGRAFÍAS DE LDT SITUADAS SOBRE EL ROTADOR PARA REALIZAR LOS GIROS VERTICALES. DETERMINACIÓN DE LAS ENERGÍAS UMBRALES LATERALES DEL QM EN 2010.....	105
FIG. 4-1. EVOLUCIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DURANTE EL ENSAYO [JIM04] .....	111
FIG. 4-2. RESULTADOS DE LA DEGRADACIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS ENSAYOS DE IRRADIACIÓN IONIZANTE.....	113
FIG. 4-3. EVOLUCIÓN DE LA FOTOSENSIBILIDAD DURANTE EL ENSAYO [JIM04] .....	114
FIG. 4-4. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA EMITIDA EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA RECIBIDA POR LOS LED ENSAYADOS DE LAS MARCAS: <i>EPITEX</i> , <i>CLAIREX</i> Y <i>ROITHNER LASERTECHNIK</i> .....	117
FIG. 4-5. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA EMITIDA EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA RECIBIDA POR LOS LED ENSAYADOS DE LAS MARCAS: <i>OSRAM</i> Y <i>VISHAY</i> .....	117
FIG. 4-6. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA EMITIDA EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA RECIBIDA POR LOS LED ENSAYADOS DE LAS MARCAS: <i>HITACHI</i> Y <i>HAMAMATSU</i> . .....	117

FIG. 4-7. RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA ALGUNOS COMPONENTES IRRADIADOS DURANTE LAS CAMPAÑAS REALIZADAS ENTRE 2004 Y 2006 (TABLA 4-2) .....	119
FIG. 4-8. AUMENTO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL FOTODIODO S5106 DE HAMAMATSU. LA LÍNEA AZUL ES UNA LÍNEA DE REFERENCIA PARA FACILITAR LA COMPARACIÓN ENTRE LAS TRES GRÁFICAS: 60 MeV (ARRIBA), 50 MeV (EN MEDIO) Y 30 MeV (ABAJO) .....	120
FIG. 4-9. FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE DIFERENTES FOTODIODOS. PARA TENER UNA VISIÓN GLOBAL DE LA SITUACIÓN SE HAN INCLUIDO EL S7510 Y S5107, DE LA FAMILIA DEL S5106, QUE FUERON IRRADIADOS EN CAMPAÑAS POSTERIORES .....	121
FIG. 4-10. DEGRADACIÓN DE LA FOTOSENSIBILIDAD DE DISTINTOS FOTODIODOS EN DIFERENTES CONDICIONES .....	122
FIG. 4-11. DEGRADACIÓN DE LA FOTOSENSIBILIDAD DEL S5106 EN DIFERENTES CONDICIONES .....	122
FIG. 4-12. FAMILIA DEL S5107 DE HAMAMATSU .....	123
FIG. 4-13. FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS FOTODIODOS S5107, S7510 Y S5106 [JIM07]. .....	124
FIG. 4-14. NIEL NORMALIZADO A $P^+$ DE 49,85 MeV DE LOS TRES FOTODIODOS IRRADIADOS: S5106, S5107 Y S7510. LOS DATOS SON AJUSTADOS A UNA ECUACIÓN TIPO POTENCIAL COMO LA MOSTRADA EN [4-1] .....	125
FIG. 4-15. NIEL NORMALIZADO A $P^+$ DE 49,85 MeV PARA EL FOTODIODO S5107 EMPLEADO EN LDT. SE PRESENTAN LOS DATOS PROPORCIONADOS POR [VAS00] PARA LOS RESULTADOS DE SUMMERS [SUM93] Y HUHTINEN [HUH93] PARA SILICIO .....	126
FIG. 4-16. CORRIENTE DE OSCURIDAD EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA DE PROTONES DE 50,41 MeV .....	130
FIG. 4-17. CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL S5107 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA CON DOS FLUJOS DIFERENTES. SE REPRESENTAN SU AJUSTE LINEAL. LA PENDIENTE DE DICHO AJUSTE ES EL FACTOR DE DAÑO .....	131
FIG. 4-18. FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL FOTODIODO S5107 DE LDT EN FUNCIÓN DE FLUJO DE IRRADIACIÓN .....	131
FIG. 4-19. RECUPERACIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD. EN CONDICIONES DE ILUMINACIÓN Y EN CONDICIONES DE OSCURIDAD [JIM07] .....	132
FIG. 4-20. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL S5106 CON SU AJUSTE LOGARÍTMICO Y EL MODELO DE M.MOLL ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) .....	133
FIG. 4-21. FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL FOTODIODO S5106 EN FUNCIÓN DE LA POLARIZACIÓN DE MEDIDA. SE COMPARAN LOS RESULTADOS DE UNIDADES IRRADIADAS POLARIZADAS (ROJO) CON OTRAS SIN POLARIZAR (NEGRO) .....	135
FIG. 4-22. FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL FOTODIODO S5107 DE LDT EN FUNCIÓN DE FLUJO DE IRRADIACIÓN. A LA IZQUIERDA CON EL EJE DE LA POLARIZACIÓN EN ESCALA LOGARÍTMICA, A LA DERECHA UNA AMPLIACIÓN EN ESCALA LINEAL DE LOS VOLTAJES COMPRENDIDOS ENTRE 0 Y 1 V .....	137
FIG. 4-23. CORRIENTE DE IONIZACIÓN GENERADA EN LOS FOTODIODOS S5107 EN FUNCIÓN DE FLUJO DE PROTONES DE 50 MeV .....	137
FIG. 4-24. POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA DEL LED S9338 DE LDT, EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA. DE ESTA GRÁFICA HAN SIDO ELIMINADOS LOS PUNTOS CORRESPONDIENTES A LOS FLUJOS DE LAS TARJETAS OPTO1	



Y OPTO3 POR TENER UN RUIDO EXCESIVO. SE REPRESENTA LA LÍNEA DE TENDENCIA EXPONENCIAL QUE MEJOR SE AJUSTA .....	138
FIG. 4-25. EL MODELO EXPONENCIAL Y EL LINEAL DEL FACTOR DE DAÑO DE LA POTENCIA DE EMISIÓN DEL LED ( $K_{LED}$ ), EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA Y DEL TIEMPO DE MISIÓN DE LDT A BORDO DE NANOSAT-1B .....	140
FIG. 4-26. POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA DEL LED S9338 DE LDT EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA. DE ESTA GRÁFICA HAN SIDO ELIMINADOS LOS PUNTOS CORRESPONDIENTES A LOS FLUJOS DE LAS TARJETEAS OPTO1 Y OPTO3 POR TENER UN RUIDO EXCESIVO. SE REPRESENTA LA LÍNEA DE TENDENCIA EXPONENCIAL QUE MEJOR SE AJUSTA .....	141
FIG. 4-27. POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA DEL LED S9338 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA ACUMULADA. LOS DATOS REPRESENTADOS CORRESPONDEN A IRRADIACIONES REALIZADAS CON TRES FLUJOS DIFERENTES (CADA UNO EN UN COLOR DISTINTO) QUE CORRESPONDEN A DISTINTAS TARJETAS DE IRRADIACIÓN .....	142
FIG. 4-28. FACTOR DE DAÑO INICIAL DEL LED S9338 DE LDT EN FUNCIÓN DE FLUJO DE IRRADIACIÓN .....	142
FIG. 4-29. RECUPERACIÓN DE LOS LED ALIMENTADOS A LA MÁXIMA CORRIENTE QUE SOPORTAN. [JIM06] .....	144
FIG. 4-30. RECUPERACIÓN DE LOS LED SIN ALIMENTAR. [JIM06] .....	144
FIG. 5-1. DIBUJO DE UN PISO DE LDT EN EL QUE SE MUESTRAN LAS DISTINTAS PARTES Y DISPOSITIVOS. SE MUESTRAN TAMBIÉN LOS APANTALLAMIENTOS LATERALES: 1.) APANTALLAMIENTO IZQUIERDO 2.) APANTALLAMIENTO SUPERIOR 3.) APANTALLAMIENTO DERECHO .....	151
FIG. 5-2. ESQUEMA DE LA POSICIÓN DE LDT EN EL INTERIOR DE NANOSAT-1B, SE SEÑALA LA ZONA DE “ARRIBA” Y DE “ABAJO” DEL SATELITE, Y COMO HACIA ABAJO LDT ESTÁ MÁS APANTALLADO .....	152
FIG. 5-3. CORTE DE LA ESTRUCTURA DE LOS PISOS DE LDT .....	153
FIG. 5-4. FOTOGRAFÍAS DEL MONTAJE EMPLEADO PARA EL ENSAYO DE LA DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES Y DEL ACABADO SUPERFICIAL DE LA CAVIDAD DE UN PISO DE LDT. DE IZQUIERDA A DERECHA: ESTRUCTURA CERRADA; ESTRUCTURA CON EL TECHO ABIERTO; ESTRUCTURA CON EL TECHO ABIERTO DEJANDO VER EL FOTODIODO Y EL LED .....	155
FIG. 5-5. FOTOCORRIENTES DEL FOTODIODO NORMALIZADAS AL MÁXIMO PARA DIFERENTES ALIMENTACIONES Y REFLECTANCIAS INTERIORES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DEL TECHO .....	156
FIG. 5-6. SENSIBILIDAD DE LA FOTOCORRIENTE A DIFERENTES TEMPERATURAS, EN UNA ESTRUCTURA QUE SIMULA UN PISO DE LDT CON EL TECHO A 0,7 MM DE LA PARTE SUPERIOR DEL LED .....	157
FIG. 5-7. RANGO DE PENETRACIÓN MÁXIMO DE PROTONES EN ALUMINIO EXPRESADO EN MILÍMETROS. VALORES OBTENIDOS A PARTIR DE DATOS DE [NIST_P] .....	158
FIG. 5-8. GRÁFICA QUE RELACIONA LOS MILÍMETROS DE ALUMINIO CON EL PESO DEL APANTALLAMIENTO Y LA ENERGÍA MÁXIMA APANTALLADA .....	158
FIG. 5-9. SIMULACIÓN DE UN ENTORNO DE RADIACIÓN SIMILAR AL DEL SATELITE NANOSAT-1B. SIMULACIÓN REALIZADA CON LOS DATOS ORBITALES DEL SATELITE SEOSAT/INGENIO [IBA07] .....	163
FIG. 5-10. PROPAGACIÓN DEL ENTORNO DE RADIACIÓN SIMILAR AL DE NANOSAT-1B. SIMULACIÓN REALIZADA CON LOS DATOS ORBITALES DEL SATELITE SEOSAT/INGENIO [IBA07] .....	163

FIG. 5-11. FOTOGRAFÍAS DE LOS PISOS DE LDT DURANTE LAS MEDIDAS DE ESTANQUEIDAD ÓPTICA. DE IZQUIERDA A DERECHA: PISOS Y TARJETAS ELECTRÓNICAS DESMONTADOS; ESTRUCTURA CON LOS OCHO PISOS MONTADOS; ESTRUCTURA DE LOS PISOS TOTALMENTE ENCINTADOS Y AISLADOS ÓPTICAMENTE DE LA LUZ EXTERIOR.....	169
FIG. 5-12. VISTA EN 3D DE LA ESTRUCTURA COMPLETA DE LDT .....	173
FIG. 5-13. DETALLES DE LA TARJETA ELECTRÓNICA DE LOS PISOS DE LDT: A) IMAGEN DELANTERA; B) IMAGEN TRASERA; C) DETALLE DEL SENSOR TÉRMICO EMBUTIDO EN LA PCB Y EN CONTACTO DIRECTO CON EL FOTODIODO; D) UNO DE LOS PISOS DEL MODELO DE CALIFICACIÓN (QM) .....	174
FIG. 5-14. DETALLES DE LA TARJETA ELECTRÓNICA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE LDT: A) IMAGEN DELANTERA; B) IMAGEN TRASERA; C) MOMENTO EN EL QUE SE PROCEDÍA A CERRAR EL MODELO QM.....	175
FIG. 5-15. IMAGEN DEL MODELO FM DE LDT.....	177
FIG. 6-1. VISTA SUPERIOR DE LAS DIRECCIONES Y SENTIDOS DE IRRADIACIÓN DE LDT .....	184
FIG. 6-2. VISTA LATERAL DE LAS DIRECCIONES Y SENTIDOS DE IRRADIACIÓN DE LDT .....	184
FIG. 6-3. MODELO EN 3D DE LDT EN EL QUE SE MUESTRAN 13 DE LOS 14 VECTORES DE INCIDENCIA DE LOS PROTONES DURANTE LAS CARACTERIZACIONES ANGULARES. EL #14 NO SE VE POR QUEDAR OCULTO DETRÁS DE LDT.....	184
FIG. 6-4. REPRESENTACIÓN DE LAS ENERGÍAS UMBRALES TRASERA Y DELANTERA EN FUNCIÓN DEL PISO DE LDT. NÓTESE QUE COINCIDEN EN EL PISO 7.....	187
FIG. 6-5. REPRESENTACIÓN DE LAS ENERGÍAS UMBRALES LATERALES, TRASERA (#1) Y DELANTERA (#5) EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE IRRADIACIÓN.....	189
FIG. 6-6. FACTORES DE CORRECIÓN DE LA HOMOGENEIDAD DEL HAZ.....	193
FIG. 6-7. EVOLUCIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL PISO 1 DE LDT EN FUNCIÓN DE UNA FLUENCIA DE PROTONES DE SU ENERGÍA UMBRAL.....	194
FIG. 6-8. AJUSTE LINEAL DE LA FOTOCORRIENTE GENERADA EN EL PISO 1 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 50,41 MeV .....	194
FIG. 6-9. AJUSTE LINEAL DE LA SEÑAL DEL TMP36 DEL PISO 1 DE LA TORRE 2 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 10,67 MeV.....	194
FIG. 6-10. EJEMPLO DE UNA MATRIZ TRIANGULAR DE FACTORES DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD CON CINCO ELEMENTOS DE TRANSICIÓN.....	196
FIG. 6-11. ESQUEMA DE LAS 4 MATRICES QUE SERÁN MOSTRADAS A LO LARGO DE LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	197
FIG. 6-12. REPRESENTACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS DEL HAZ DE IRRADIACIÓN, DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA AL FLUJO, EN FUNCIÓN DEL PASO DE IRRADIACIÓN .....	200
FIG. 6-13. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA TORRE DE FOTODIODOS, SUS ERRORES Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE D .....	203
FIG. 6-14. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA TORRE DE LED, SUS ERRORES Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE D .....	203
FIG. 6-15. REPRESENTACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS DEL HAZ DE IRRADIACIÓN DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LA FLUENCIA, EN FUNCIÓN DEL PASO DE IRRADIACIÓN .....	206

FIG. 6-16. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DE LA TORRE DE FOTODIODOS Y SUS ERRORES Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE D.....	208
FIG. 6-17. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DE LA TORRE DE LED, SUS ERRORES Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE D. ....	209
FIG. 6-18. FOTOCORRIENTE GENERADA EN EL PISO 1 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 50,41 MeV (ENERGÍA UMBRAL DEL PISO 4).....	209
FIG. 6-19. FOTOCORRIENTE GENERADA EN EL PISO 1 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 63,54 MeV (ENERGÍA UMBRAL DEL PISO 6).....	209
FIG. 6-20. FOTOCORRIENTE GENERADA EN EL PISO 1 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 40,9 MeV (ENERGÍA UMBRAL DEL PISO 3) .....	210
FIG. 6-21. FOTOCORRIENTE GENERADA EN EL PISO 7 EN FUNCIÓN DE LA FLUENCIA DE PROTONES DE 40,9 MeV (ENERGÍA UMBRAL DEL PISO 3) .....	210
FIG. 6-22. PANTALLAZO DE EGSE TRAS LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS SENSORES DE RADIACIÓN DE LDT .....	214
FIG. 6-23. FOTOCORRIENTE GENERADA EN LOS PISOS DE LA TORRE DE LUZ EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA REGISTRADA POR LOS TMP-36. LA VARIACIÓN SE DEBE PRINCIPALMENTE AL CAMBIO DE LA POTENCIA ÓPTICA EMITIDA POR LOS LED QUE ILUMINAN A LOS FOTODIODOS.....	215
FIG. 6-24. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL AJUSTE LINEAL DE LA DEPENDENCIA TÉRMICA DE LOS PISOS DE LA TORRE DE LED .....	216
FIG. 6-25. CORRIENTE MEDIDA SIN ILUMINACIÓN EN LOS FOTODIODOS DE LOS PISOS DE LA TORRE DE OSCURIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA .....	218
FIG. 6-26. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DEL <i>OFFSET</i> ( $A_0$ ) Y DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD A 25.7°C ( $A_1$ ) DEL AJUSTE EXPONENCIAL DE LA DEPENDENCIA TÉRMICA DE LOS PISOS DE LA TORRE DE OSCURIDAD .....	220
FIG. 6-27. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VALORES DE LA SENSIBILIDAD A LOS CAMBIOS TÉRMICOS DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS PISOS DE LA TORRE DE OSCURIDAD.....	220
FIG. 6-28. RESPUESTA DE UN TMP 36 VS. LA TID [GON13] .....	221
FIG. 7-1. TRAYECTORIA SEGUIDA POR NANOSAT-1B Y LOS PUNTOS DE ACTIVACIÓN DE LDT DURANTE SU PRIMERA ACTIVACIÓN EL 02/08/2009 CUATRO DÍAS DESPUÉS DEL LANZAMIENTO.....	228
FIG. 7-2. ACTIVACIONES DE FRECUENCIA 2 MINUTOS DE DOS ÓRBITAS CONSECUTIVAS DE NANOSAT-1B .....	229
FIG. 7-3. REPRESENTACIÓN DE LAS MEDIDAS REALIZADAS POR LDT DURANTE CASI 9,5 ÓRBITAS EN UN INTERVALO DE UNAS 14,5 HORAS. LOS NÚMEROS IDENTIFICAN CADA UNA DE LAS ÓRBITAS, Y LAS FLECHAS EL SENTIDO DE AVANCE DEL SATÉLITE. EN ROJO LAS ZONAS DIURNAS, EN MORADO LAS ZONAS EN ECLIPSE.....	229
FIG. 7-4. REPRESENTACIÓN DE LA ALTURA DEL SATÉLITE DURANTE 9 ÓRBITAS DEL DÍA 04/08/2009 .....	230
FIG. 7-5. ALTURA DE NANOSAT-1B DURANTE LAS ACTIVACIONES DE LOS 3 ÚLTIMOS MESES DE 2010 .....	231
FIG. 7-6. ALTURA MEDIA MENSUAL DE NANOSAT-1B DESDE SU LANZAMIENTO HASTA OCTUBRE DE 2014 .....	231
FIG. 7-7. TEMPERATURA DEL PISO 3 DE LA TORRE DE OSCURIDAD DURANTE LA PRIMERA ACTIVACIÓN CON COBERTURA GLOBAL EL 04/08/2009 .....	232
FIG. 7-8. TWO-LINE ELEMENT SET – TLE. [NASA] .....	232

FIG. 7-9. POSICIÓN DE LOS RADFET DENTRO DE LA CAJA DE SENSORES EN EL LLAMADO PLANO ECUATORIAL DE NANOSAT-1B.....	236
FIG. 7-10. ESQUEMA Y FOTOGRAFÍA DE NANOSAT-1B EN LAS QUE SE INDICAN LA POSICIÓN DE LDT Y DE LA TARJETA CON LOS RADFET [JIM10] .....	236
FIG. 7-11. POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE LDT EN EL PLANO ECUATORIAL DE NANOSAT-1B .....	236
FIG. 7-12. FLUENCIA ESPECTRAL INTEGRAL Y DIFERENCIAL DE PROTONES ATRAPADOS ACUMULADA DURANTE EL AÑO 2010 Y 2014, EN MÍNIMO Y EN MÁXIMO SOLAR, RESPECTIVAMENTE .....	238
FIG. 7-13. FLUENCIA INTEGRAL DE PROTONES (AÑO 2010) PARA DIFERENTES BLINDAJES ESFÉRICOS DE ALUMINIO .....	238
FIG. 7-14. AMPLIACIÓN DE LA FIG. 7-13 .....	238
FIG. 7-15. TID AÑO 2010 .....	239
FIG. 7-16. TNID AÑO 2010 .....	239
FIG. 7-17. TID Y TNID ACUMULADA EN LA ÓRBITA DE NANOSAT-1B EN FUNCIÓN DEL TIEMPO. SE REPRESENTA EL VALOR CALCULADO PARA DIFERENTES ESPESORES DE UN APANTALLAMIENTO ESFÉRICO DE ALUMINIO .....	240
FIG. 7-18. DOSIS TOTAL ACUMULADA POR LOS RADFET DE NANOSAT-1B [FER10].....	240
FIG. 7-19. TID ACUMULADA EN LA POSICIÓN DE LOS RADFET DE NANOSAT-1B. LOS DATOS MOSTRADOS CORRESPONDEN A LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES OBTENIDAS POR LOS RADFET, Y A LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	242
FIG. 7-20. TASA DE DOSIS MEDIA OBTENIDA POR LOS RADFET EN ÓRBITA Y CON LA SIMULACIÓN DE UNA ESFERA DE 45 MM DE ESPESOR DE ALUMINIO .....	243
FIG. 7-21. TNID OBTENIDA POR SIMULACIÓN CON EL MODELO 3D DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE EN CADA UNO DE LOS PISOS DE LDT.....	244
FIG. 7-22. TNID OBTENIDA POR SIMULACIÓN USANDO LA ESTRUCTURA 3D DE NANOSAT-1B EN LA POSICIÓN DEL PISO 7 DE LDT (CON LOS DATOS ORBITALES DE JUSTO DESPUÉS DEL LANZAMIENTO), Y USANDO LAS ESFERAS HUECAS DE ALUMINIO DE DIFERENTES ESPESORES (EMPLEANDO LOS DATOS ORBITALES DE DISTINTOS PERIODOS DE LA EXPLOTACIÓN DE NANOSAT-1B) .....	245
FIG. 7-23. PASE DIURNO POR LA AAS .....	248
FIG. 7-24. PASE NOCTURNO POR LA AAS.....	248
FIG. 7-25. PASE DIURNO POR LA AAS EN 5 DÍAS CONSECUTIVOS.....	249
FIG. 7-26. PASES DIURNOS POR LA AAS DE DOS ÓRBITAS SEPARADAS 6 DÍAS.....	249
FIG. 7-27. PASES EN ECLIPSE POR LA AAS DÍAS CONSECUTIVOS EN INVIERNO: A), B) Y C); Y EN VERANO: D) .....	250
FIG. 7-28. VENTANAS DE ACTIVACIÓN NOMINAL.....	251
FIG. 7-29. PARÁMETROS DE LAS ACTIVACIONES DE LDT DESDE EL LANZAMIENTO EL 29/07/2009 HASTA EL 15/10/2014. ....	253
FIG. 7-30. REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MEDIDAS REALIZADAS DURANTE EL PERIODO MANUAL DE PROGRAMACIÓN DE LDT .....	255
FIG. 7-31. MEDIDAS REALIZADAS DURANTE EL PERIODO DE ACTIVACIÓN AUTOMÁTICO NOMINAL .....	255
FIG. 7-32 MEDIDAS REALIZADAS DURANTE EL PERIODO ACTIVACIÓN AUTOMÁTICO NOMINAL EXTENDIDO .....	255

FIG. 7-33. REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MEDIDAS REALIZADAS DURANTE 3 MESES DEL PERIODO AUTOMÁTICO NOMINAL (IZQUIERDA), Y DEL INICIO DEL NOMINAL RESTRINGIDO (DERECHA) .....	256
FIG. 7-34. REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MEDIDAS REALIZADAS DURANTE 3 MESES A FINALES DE 2012 (IZQUIERDA), Y DE JULIO, AGOSTO Y SEPTIEMBRE DE 2014 (DERECHA) .....	257
FIG. 7-35. FLUJO SEGUIDO POR DE LOS DATOS DE LDT DESDE NANOSAT-1B HASTA EL EXPERIMENTADOR.....	258
FIG. 7-36. PANTALLAZO DE LA REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE UNA TM DE LDT. SE SEÑALA A QUE CORRESPONDE CADA CAMPO O CONJUNTO DE CAMPOS DE LA ESTRUCTURA. ....	260
FIG. 7-37. TEMPERATURA DE LOS FOTODIÓDOS DE LA TORRE DE LUZ EN GRADOS CENTÍGRADOS .....	262
FIG. 7-38. SEÑALES DE LA FOTOCORRIENTE DE LA TORRE DE LUZ (PROPORCIONAL A LA EMISIÓN DEL LED) EXPRESADA EN AMPERIOS, Y SIN HABER APLICADO CORRECCIÓN ALGUNA .....	262
FIG. 7-39. DEPENDENCIA LINEAL DE PENDIENTE NEGATIVA DE LA CORRIENTE MEDIDA EN LOS FOTODIÓDOS DE LA TORRE DE LUZ, CON LA TEMPERATURA. ....	263
FIG. 7-40. TEMPERATURA MEDIDA POR LOS SENSORES TMP-36 PEGADOS EN LOS FOTODIÓDOS DE LA TORRE DE OSCURIDAD, DURANTE LAS DOS ÓRBITAS DE LA MADRUGADA DEL 01/02/2010 .....	264
FIG. 7-41. SEÑAL EN OSCURIDAD DE LOS FOTODIÓDOS DE LA TORRE DE FOTODIÓDOS.....	264
FIG. 7-42. DEPENDENCIA DE LA CORRIENTE MEDIDA EN LOS FOTODIÓDOS DE LA TORRE DE OSCURIDAD CON LA TEMPERATURA, SE APRECIA LA TENDENCIA EXPONENCIAL CARACTERÍSTICA DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD. ....	265
FIG. 7-43. FOTOCORRIENTE DE LOS FOTODIÓDOS DE LA “TORRE DE LUZ” TRAS LA CORRECCIÓN TÉRMICA .....	267
FIG. 7-44. CORRIENTE EN OSCURIDAD DE LA “TORRE DE OSCURIDAD” DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN TÉRMICA. ....	268
FIG. 7-45. CORRIENTE DE IONIZACIÓN DE LA TORRE DE OSCURIDAD .....	270
FIG. 7-46. CORRIENTE DE IONIZACIÓN DE LA TORRE DE OSCURIDAD DE UN DÍA CON UNA SEÑAL ALTAMENTE RUIDOSA .....	271
FIG. 8-1. MAPAS DE FLUJO A UNA ALTURA DE 675 KM CON DATOS ACUMULADOS DURANTE 6, 12, 18 Y 24 MESES .....	279
FIG. 8-2. ACUMULACIÓN DE 24 MESES DE DATOS EN LA CAPA MÁS ALTA (685 KM) Y LA MÁS BAJA (585 KM) .....	279
FIG. 8-3. EFECTO DEL CORRIMIENTO AL ESTE DE LAS VENTANAS DE ACTIVACIÓN SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA FLUENCIA INTEGRANDO EL FLUJO DE LA AAS .....	288
FIG. 8-4. FACTOR DE CORRECCIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FLUENCIA A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DEL FLUJO .....	288
FIG. 8-5. FLUJO DE PROTONES REGISTRADO POR GOES-13 DURANTE EL EVENTO DEL 04/08/2011 [GOES] .....	289
FIG. 8-6. DEGRADACIÓN DE LA POTENCIA OPTICA EMITIDA POR EL LED, EN LA TORRE DE LUZ, MEDIDA POR EL FOTODIÓDO [JIM10].....	292
FIG. 8-7. AUMENTO DE LA CORRIENTE EN OSCURIDAD DEL FOTODIÓDO DE LA TORRE DE OSCURIDAD [JIM10] .....	292
FIG. 8-8. SEÑAL MEDIDA EN EL PISO 7 DE LA TORRE DE LUZ (VERDE) Y DE LA TORRE DE OSCURIDAD (AZUL) DURANTE LA FASE DE EXPLOTACIÓN DE LDT .....	293
FIG. 8-9. SEÑAL DE IONIZACIÓN MEDIDA EN EL PISO 7 DE TORRE DE OSCURIDAD DURANTE LOS PRIMEROS MESES DE EXPLOTACIÓN DE LDT [JIM10].....	294
FIG. 8-10. FOTOCORRIENTE MEDIDA EN LA TORRE DE LED EN DIFERENTES FECHAS (IZQUIERDA), Y SU DISMINUCIÓN ABSOLUTA DESDE ENERO DE 2010 (DERECHA).....	295
FIG. 8-11. CORRIENTE EN OSCURIDAD DE LA TORRE DE FOTODIÓDOS EN DIFERENTES FECHAS (IZQUIERDA), Y SU AUMENTO ABSOLUTO DESDE ENERO DE 2010 (DERECHA) .....	295

FIG. 8-12. INCERTIDUMBRE DE LA FOTOCORRIENTE CALCULADA POR MEDIO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA DE 10 DÍAS (IZQUIERDA) Y CALCULADO APLICANDO LA PROPAGACIÓN DE ERRORES A PARTIR (DERECHA) .....	295
FIG. 8-13. INCERTIDUMBRE DE LA CORRIENTE EN OSCURIDAD CALCULADA POR MEDIO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA DE 10 DÍAS (IZQUIERDA) Y ERROR OBTENIDO POR MEDIO DE LOS DATOS ESTADÍSTICOS QUE PROPORCIONA EL INSTRUMENTO (DERECHA).....	296
FIG. 8-14. CORRIENTE DE IONIZACIÓN DEL PISO 6 DE LDT REPRESENTADA SOBRE UN MAPAMUNDI [JIM12].....	297
FIG. 8-15. MAPAS DE FLUJO DE PROTONES EXPRESADO EN EQUIVALENTES DE 10 MeV, MEDIDOS A TRAVÉS DEL PISO 7, A UNA ALTURA DE ENTRE 630 KM Y 640 KM .....	298
FIG. 8-16. AAS MEDIDA POR LDT Y SIMULADA CON EL MODELO AP-8 MIN .....	299
FIG. 8-17. AAS MEDIDA POR LDT Y SIMULADA CON EL MODELO AP-8 MAX .....	299
FIG. 8-18. AAS MEDIDA POR LDT Y SIMULADA CON EL MODELO CRRESPRO QUIET FLUX .....	300
FIG. 8-19. AAS MEDIDA POR LDT Y SIMULADA CON EL MODELO CRRESPRO ACTIVE FLUX .....	300
FIG. 8-20. AAS MEDIDA POR LDT Y SIMULADA CON EL MODELO DE PROTONES ATRAPADOS PSB97 QUE ES EL MÁS PARECIDO AL MOLPN DESARROLLADO EN ESTE TRABAJO .....	300
FIG. 8-21. DISTANCIA DEL MÁXIMO DE LA AAS OBTENIDA POR EL LDT Y OTROS MODELOS [JIM12] .....	301
FIG. 8-22. FLUJO DE PROTONES OBTENIDOS POR EL LDT Y OTROS MODELOS [JIM12] .....	301
FIG. 8-23. RESULTADO DE LA COMPARACIÓN ENTRE ALGUNOS MODELOS DE PROTONES ATRAPADOS Y EL MOLPN [JIM12].....	301
FIG. 8-24. TNID OBTENIDO MEDIANTE LAS SIMULACIONES CON EL MODELO 3D DE NANOSAT-1B, LA SIMULACIÓN CON ESFERAS HOMOGÉNEAS DE DISTINTOS ESPESORES, Y LOS DATOS OBTENIDOS POR EL PISO 7 DE LDT, USANDO LOS MÉTODOS DIRECTOS (CON LA TORRE DE LUZ Y LA TORRE DE OSCURIDAD) Y EL MÉTODO INDIRECTO (INTEGRANDO LA SEÑAL DE IONIZACIÓN DE LA TORRE DE OSCURIDAD) .....	303
FIG. 8-25. FLUJO EQUIVALENTE MEDIO (DE PROTONES DE 10 MeV) OBTENIDO POR LDT Y CALCULADO CON LA SIMULACIÓN DEL CASO DE LA ESFERA DE 60 MM DE ALUMINIO. ....	304
FIG. 8-26. TEMPERATURA MEDIA MEDIDA POR UN PISO DE LDT A LO LARGO DE TODA LA EXPLOTACIÓN. SE OBSERVA UNA VARIACIÓN ARMÓNICA DE UN AÑO DE PERIODO .....	305
FIG. 8-27. TASA DE TID Y TASA DE TNID DE LDT, RADFET Y SIMULACIONES. SE OBSERVA LA TENDENCIA SINUSOIDAL DE PERIODO ANUAL.....	305
FIG. 8-28. COMPARACIÓN DE LA FLUENCIA EQUIVALENTE DE PROTONES FRONTALES DE 10 MeV ENTRE LA TORRE DE OSCURIDAD Y LA SIMULACIÓN REALIZADA CON EL MODELO 3D DEL SATÉLITE PARA EL PRIMER AÑO DE EXPLOTACIÓN .....	307
FIG. 8-29. TNID ACUMULADA EN 1 AÑO Y EN 5, PARA LOS DIFERENTES MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE LDT. ....	308
FIG. 8-30. REGISTRO DE GOES-13 DEL MES DE AGOSTO DE 2011 [GOES] .....	311
FIG. 8-31. ZOOM DE LOS DATOS DE PROTONES DEL REGISTRO DE GOES-13 (04/08/2011) [GOES] .....	311
FIG. 8-32. REGISTRO DE GOES-13 DEL MES DE MARZO DE 2012. MES EN EL QUE SE PRODUJO EL EVENTO MÁS INTENSO DE LA EXPLOTACIÓN DE LDT [GOES] .....	312
FIG. 8-33. ZOOM DE LOS DATOS DE PROTONES DEL REGISTRO DE GOES-13 DEL EVENTO MÁS INTENSO DE LA EXPLOTACIÓN. (07/03/2012) [GOES] .....	312

FIG. 8-34. NUMERO DE MANCHAS SOLARES DETECTADAS DESDE EL AÑO 2000, Y PREDICCIÓN DE SU EVOLUCIÓN .....	313
FIG. 8-35. DIFERENCIA EN LA SEÑAL DE IONIZACIÓN EN LOS PISOS DE LDT Y EL MOLPN EL 27/09/2010 (PASE NOCTURNO) EN EL QUE PARECE QUE SE DETECTA UN EVENTO DE PROTONES .....	314
FIG. 8-36. SEÑAL DE IONIZACIÓN DE LDT (27/09/2010 PASE NOCTURNO) Y MOLPN. LA AAS MOSTRADA POR LDT ESTÁ DESPLAZADA AL NORTE RESPECTO DEL MOLPN .....	314
FIG. 8-37. DIFERENCIA EN LA SEÑAL DE IONIZACIÓN EN LOS PISOS DE LDT Y EL MOLPN EL 27/09/2010 (PASE DIURNO) EN EL QUE PARECE QUE SE DETECTA UN EVENTO DE PROTONES .....	314
FIG. 8-38. SEÑAL DE IONIZACIÓN DE LDT (27/09/2010 PASE DIURNO) Y MOLPN. LA AAS MOSTRADA POR LDT ESTÁ DESPLAZADA AL SUR RESPECTO DEL MOLPN .....	314
FIG. 9-1. ATERRIJAJE Y UBICACIÓN DE METSIS.....	328
FIG. 9-2. METSIS .....	328
FIG. 9-3. CAPACIDADES DEL METSIS .....	329
FIG. 9-4. EL PROGRAMA EXOMARS .....	330
FIG. 9-5. FASES DEL ATERRIJAJE DEL EDM DE EXOMARS 2016 .....	330
FIG. 9-6. PROTOTIPO DEL ROVER DE EXOMARS 2018 .....	330
FIG. 9-7. VISTA GENERAL DE LOS INSTRUMENTOS DE DREAMS DE EXOMARS 2016 EN EL EDM .....	331
FIG. 9-8. CABEZA ÓPTICA DEL SIS DE EXOMARS 2016 .....	331
FIG. 9-9. CORRIENTE DE OSCURIDAD DEL S5106 DEL SIS DE EXOMARS 2016 .....	331
FIG. 9-10. EL ROVER DE MARS 2020.....	332
FIG. 9-11. UBICACIÓN DEL RDS EN EL ROVER .....	332
FIG. 9-12. MODELO DE INGENIERÍA PARA ENSAYOS DE CICLADO TÉRMICOS DEL RDS DE MEDA EN INTEGRACIÓN .....	332
FIG. 9-13. SEOSAT / INENIO .....	333
FIG. 9-14. UBICACIÓN DE TTT EN SEOSAT / INENIO .....	334
FIG. 9-15. TECNOLOGIAS SENSORAS PARA TTT .....	334
FIG. 9-16. CALIBRACIÓN DEL TMP-36 PARA TTT [GON13].....	335
FIG. B-17. ESQUEMA DE BLOQUES DE LA ELECTRÓNICA DE SENSADO Y CONTROL DE LDT [APE10].....	358
FIG. B-18. MECÁNICA DEL PISO DE LA ELECTRÓNICA .....	359
FIG. B-19. MECÁNICA DEL PISO TRASERO .....	360
FIG. B-20. MECÁNICA DE UNO PISO INTERMEDIO.....	361
FIG. B-21. MECÁNICA DEL PISO DE APANTALLAMIENTO FRONTAL .....	362
FIG. C-22. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA SEÑAL DE LOS TMP-36 DE LA TORRE DE OSCURIDAD Y SUS ERRORES Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE C.....	364
FIG. C-23. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA SEÑAL DE LOS TMP-36 DE LA TORRE DE LED Y SUS ERRORES Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE C.....	365

FIG. C-24. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DE LOS TMP-36 LA TORRE DE FOTODIODOS Y SUS ERRORES Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE C .....	367
FIG. C-25. REPRESENTACIÓN CROMÁTICA DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DE LOS TMP-36 LA TORRE DE LED Y SUS ERRORES Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL. RESULTADOS NUMÉRICOS EN EL APÉNDICE C .....	367
FIG. D-26. FACTORES DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS FOTODIODOS – MATRIZ DEL SISTEMA DE LA TORRE DE FOTODIODOS .....	370
FIG. D-27. ERRORES ESTADÍSTICOS DEL FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS FOTODIODOS - TORRE DE FOTODIODOS .....	370
FIG. D-28. ERRORES ESTADÍSTICOS PORCENTUALES DEL FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS FOTODIODOS - TORRE DE FOTODIODOS.....	371
FIG. D-29. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN LINEAL $R^2$ – TORRE DE FOTODIODOS .....	371
FIG. D-30. FACTORES DE DAÑO DE LA POTENCIA ÓPTICA DE EMISIÓN DE LOS LED – MATRIZ DEL SISTEMA DE LA TORRE DE LED .....	371
FIG. D-31, FACTORES DE DAÑO DE LA POTENCIA ÓPTICA DE EMISIÓN DE LOS LED – MATRIZ DEL SISTEMA DE LA TORRE DE LED (CON LOS ELEMENTOS DE MAYOR VALOR ELIMINADOS DE LA ESCALA CROMÁTICA) .....	372
FIG. D-32. ERROR ESTADÍSTICO DEL FACTORES DE DAÑO DE LOS LED - TORRE DE LED .....	372
FIG. D-33. ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DEL FACTORES DE DAÑO DE LOS LED – TORRE DE LED .....	372
FIG. D-34. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL $R^2$ DEL FACTORES DE DAÑO DE LOS LED – TORRE DE LED.....	373
FIG. D-35. FACTORES DE DAÑO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA CON EL TMP36 - TORRE DE OSCURIDAD .....	373
FIG. D-36. ERROR DEL FACTORES DE DAÑO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA - TORRE DE OSCURIDAD.....	373
FIG. D-37. ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA - TORRE OSCURIDAD .....	374
FIG. D-38. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL $R^2$ DEL AJUSTE DEL FACTORES DE DAÑO DE LA TEMPERATURA - TORRE DE OSCURIDAD .....	374
FIG. D-39. FACTORES DE DAÑO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA CON EL TMP36 - TORRE DE LUZ.....	374
FIG. D-40. ERROR DEL FACTORES DE DAÑO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA - TORRE DE LUZ .....	375
FIG. D-41 ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA - TORRE DE LUZ.....	375
FIG. D-42 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL $R^2$ DEL AJUSTE DEL FACTORES DE DAÑO DE LA TEMPERATURA - TORRE DE LUZ .....	375
FIG. D-43 SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 2 .....	376
FIG. D-44 ERROR ESTADÍSTICO DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 2 .....	376
FIG. D-45 ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 2.....	377
FIG. D-46. COEFICIENTE $R^2$ DEL AJUSTE LINEAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS – TORRE 2 .....	377
FIG. D-47. SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 1 .....	377
FIG. D-48. ERROR ESTADÍSTICO DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 1 .....	378
FIG. D-49 ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS - TORRE 1.....	378
FIG. D-50 COEFICIENTE $R^2$ DEL AJUSTE LINEAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LOS FOTODIODOS – TORRE 1 .....	378
FIG. D-51 SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA A TRAVÉS DEL TMP 36 - TORRE 2.....	379



FIG. D-52 ERROR ESTADÍSTICO DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE TEMPERATURA – TORRE 2 .....	379
FIG. D-53 ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA TEMPERATURA – TORRE 2 .....	379
FIG. D-54 COEFICIENTE R2 DEL AJUSTE LINEAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA A TRAVÉS DEL TMP 36– TORRE 2 .....	380
FIG. D-55 SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA A TRAVÉS DEL TMP 36 - TORRE 1.....	380
FIG. D-56 ERROR ESTADÍSTICO DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA TEMPERATURA – TORRE 1 .....	380
FIG. D-57 ERROR ESTADÍSTICO PORCENTUAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE TEMPERATURA – TORRE 1.....	381
FIG. D-58 COEFICIENTE R2 DEL AJUSTE LINEAL DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA A TRAVÉS DEL TMP 36– TORRE 1 .....	381

# Índice de Tablas

---

TABLA 2-1. IRRADIACIONES PARA VERIFICACIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA ADECUADA. ....	44
TABLA 2-2. IRRADIACIONES CON PROTONES PARA LA VERIFICACIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	44
TABLA 2-3. RESUMEN DE LOS PASOS DE IRRADIACIÓN DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DEL FACTOR DE DAÑO DE LOS APILAMIENTOS DE 9 ELEMENTOS (LDT-9-0.5-F-2 Y LDT-9-0.5-T-1).....	45
TABLA 2-4. RESUMEN DE LOS PASOS DE IRRADIACIÓN DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DEL FACTOR DE DAÑO DE LOS APILAMIENTOS DE 9 ELEMENTOS (LDT-9-0.5-F-2 Y LDT-9-0.5-T-1) Y DE 6 ELEMENTOS (LDT-6-0-T_1, LDT-6-0-T_2 Y LDT-6-0-F_1) EN LA IRRADIACIÓN #2LDT. ....	49
TABLA 3-1. CAMPAÑAS DE IRRADIACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LDT .....	70
TABLA 3-2 PASOS DE IRRADIACIÓN DURANTE LA DETERMINACIÓN DE LA DEPENDENCIA DEL FLUJO EN EL DAÑO. IRRADIACIÓN REALIZADA CON PROTONES DE 50,41 MeV.....	91
TABLA 4-1. IRRADIACIONES CON RAYOS $\gamma$ .....	109
TABLA 4-2. IRRADIACIONES CON PROTONES.....	110
TABLA 4-3. FOTODIODOS DE HAMAMATSU IRRADIADOS CON RAYOS $\gamma$ ENTRE 2003 Y 2004 .....	110
TABLA 4-4. FOTODIODOS DE VISHAY IRRADIADOS CON RAYOS $\gamma$ ENTRE 2003 Y 2004 .....	111
TABLA 4-5. RESULTADOS DE LA DEGRADACIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD DE LOS ENSAYOS DE TID .....	112
TABLA 4-6. EFECTO DE LA RADIACIÓN IONIZANTE SOBRE LA FOTOSENSIBILIDAD DE LOS FOTODIODOS .....	114
TABLA 4-7. EFECTO DE LA RADIACIÓN IONIZANTE SOBRE LA FOTOSENSIBILIDAD DE LOS FOTODIODOS .....	115
TABLA 4-8. LED IRRADIADOS DURANTE LAS CAMPAÑAS DE PROTONES ENTRE 2004 Y 2006. SE MUESTRA LA TOLERANCIA A LA RADIACIÓN ENCONTRADA DURANTE ESTOS ENSAYOS (ALTA: A; MEDIA: M; BAJA: B ; MUY BAJA: MB) .....	116
TABLA 4-9. FOTODIODOS IRRADIADOS DURANTE LAS SEIS IRRADIACIONES .....	118
TABLA 4-10. DATOS DE LOS PASOS DE IRRADIACIÓN DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DE LA DEPENDENCIA DEL FACTOR DE DAÑO DEL S5107 CON LA ENERGÍA. EL FLUJO EN TODOS LOS CASOS FUE DE $1,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	124
TABLA 4-11. DATOS DEL AJUSTE POTENCIA (" $y=a \cdot x^b$ ") DEL NIEL NORMALIZADO A PROTONES DE 49,85 MeV DE LOS DATOS DEL FOTODIODO S5107 DE LDT Y DE DATOS PARA SILICIO DE SUMMERS [SUM93 ] Y DE HUHTINEN [HUH93] PROPORCIONADOS POR [VAS00] (VALIDOS ENTRE 12 MeV Y 65 MeV) .....	126
TABLA 4-12 IRRADIACIONES DE CARACTERIZACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES LDT .....	127
TABLA 4-13. PASOS DE IRRADIACIÓN DURANTE LA DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FLUJO EN EL DAÑO. IRRADIACIÓN REALIZADA CON PROTONES DE 50,41MeV .....	128
TABLA 4-14. AJUSTE LINEAL ( $y=m \cdot x+b$ ) DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD CON LA FLUENCIA ACUMULADA DEL S5107 CON UN $r^2=0,99$ . DONDE "M" ES EL FACTOR DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD .....	130
TABLA 4-15 PARÁMETROS OBTENIDOS POR M. MOLL [MOL02] CON $\tau_2=1$ MIN, A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	133

TABLA 4-16. AJUSTE LOGARÍTMICO ( $y=A \cdot \ln(x)+B$ ) DEL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EXPRESADO EN AÑOS. SE OBTIENE UN $R^2=0,99$ . DONDE “B” ES EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN TRASCURRIDO 1 AÑO .....	134
TABLA 4-17. PARÁMETROS DEL AJUSTE EXPONENCIAL (“ $y=E^A \cdot x$ ”) DE LA POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA DEL LED S9338 CON LA FLUENCIA. SE HA OBTENIDO UN $R^2=0,97$ .....	139
TABLA 4-18. RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	147
TABLA 5-1 ESCUDOS DE ALUMINIO PROPUESTOS PARA LDT .....	160
TABLA 5-2. REQUISITOS DE ALIENACIONES DE LOS SENSORES DE RADIACIÓN .....	161
TABLA 5-3. MUESTRA EL MEJOR Y PEOR CASO DE LA FLUENCIA EQUIVALENTE DE PROTONES DE 10 MeV ACUMULADA EN LOS PISOS DE LDT. DATOS OBTENIDOS DE [IBA07] PARA UNA ÓRBITA SIMILAR A LA DE NANOSAT-1B .....	164
TABLA 5-4 ESTIMACIÓN DEL AUMENTO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD (MEJOR Y PEOR CASO) .....	164
TABLA 5-5. ESTIMACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DE LA FOTOCORRIENTE (MEJOR Y PEOR CASO) EN BASE A LAS SIMULACIONES [LTD/4520/TNO/001/INTA] Y EL FACTOR DE DAÑO MEDIDO DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS .....	165
TABLA 5-6. RESULTADOS (MEJOR Y PEOR CASO) DE LOS FLUJOS MÁXIMOS ESPERADOS EN UNA ÓRBITA SIMILAR A LA DE NANOSAT-1B. SE HAN ESTIMADO LOS RESULTADOS CON 3 MODELOS DE PROTONES DIFERENTES USANDO LAS HERRAMIENTAS WEB DE SPENVIS [SPENVIS] .....	165
TABLA 5-7 ESTIMACIÓN DEL AUMENTO DE LA CORRIENTE DE IONIZACIÓN (MEJOR Y PEOR CASO) EN BASE A LAS ESTIMACIONES HECHAS CON SPENVIS [SPENVIS] Y LA SENSIBILIDAD AL FLUJO MEDIDA DURANTE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS .....	166
TABLA 5-8. REQUISITOS PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS SENSIBLES A LA RADIACIÓN .....	166
TABLA 5-9. ESPECIFICACIÓN DE LAS SEÑALES A MEDIR DE LDT .....	167
TABLA 5-10. BASE DEL FUNCIONAMIENTO DE CADA UNO DE LOS APILAMENTOS DE LAS TORRES DE LDT. ....	173
TABLA 5-11. HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LDT .....	176
TABLA 6-1. DETALLES DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN DE LDT REALIZADOS EN EL PIF DEL PSI EN SUIZA .....	182
TABLA 6-2 DESCRIPCIÓN DE LA INCIDENCIA DE IRRADIACIÓN DE LOS 14 VECTORES SELECCIONADOS PARA IRRADIAR LATERALMENTE .....	185
TABLA 6-3. ENERGÍAS UMBRALES FRONTALES OBTENIDAS DURANTE LA PRIMERA (2008) Y SEGUNDA (2010) CAMPAÑA DE CALIBRACIÓN REALIZADA SOBRE DEL MODELO QM .....	186
TABLA 6-4. ENERGÍAS UMBRALES TRASERAS OBTENIDAS DURANTE LA SEGUNDA CAMPAÑA DE CALIBRACIÓN (2010) REALIZADA SOBRE DEL MODELO QM .....	187
TABLA 6-5. ENERGÍAS UMBRALES LATERALES OBTENIDAS DURANTE LA IRRADIACIÓN DEL 07-05-2010 REALIZADA SOBRE DEL MODELO QM .....	188
TABLA 6-6. FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA HOMOGENEIDAD DEL HAZ .....	192
TABLA 6-7. DATOS DE LOS PASOS DE IRRADIACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA AL FLUJO/IONIZACIÓN.....	198
TABLA 6-8. CONTINUACION DE LA “TABLA 6-7” .....	199
TABLA 6-9 FLUENCIAS Y DOSIS ACUMULADAS DE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA AL FLUJO – IONIZACIÓN .....	201

TABLA 6-10. CONTINUACIÓN DE LA “TABLA 6-9” .....	202
TABLA 6-11. DATOS DE LOS PASOS DE IRRADIACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA A LA FLUENCIA – DD .....	205
TABLA 6-12. FLUENCIAS Y DOSIS ACUMULADAS DE LA CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA A LA FLUENCIA – DD .....	207
TABLA 6-13. CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO .....	211
TABLA 6-14. CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ DE FACTORES DE DAÑO DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD – TORRE 2 .....	212
TABLA 6-15. PARÁMETROS DEL AJUSTE DE LA CALIBRACIÓN TÉRMICA DE LA TORRE DE LUZ .....	215
TABLA 6-16. ERRORES ESTADÍSTICOS DEL AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN TÉRMICA DE LA TORRE DE LUZ .....	215
TABLA 6-17. DIFERENCIA MÁXIMA ENTRE PISOS PARA EL TÉRMINO INDEPENDIENTE DEL AJUSTE TÉRMICO Y VALOR MÁXIMO ESPERADO EN EL DECAIMIENTO DE ESTE MISMO PARÁMETRO TRAS UNA IRRADIACIÓN COMO LA REALIZADA EN LA CALIBRACIÓN .....	217
TABLA 6-18. PARÁMETROS DEL AJUSTE DE LA CALIBRACIÓN TÉRMICA DE LA TORRE DE OSCURIDAD .....	218
TABLA 6-19. ERRORES ESTADÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS DEL AJUSTE DE LA CALIBRACIÓN TÉRMICA DE LA TORRE DE OSCURIDAD .....	219
TABLA 6-20. CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD AL FLUJO .....	222
TABLA 7-1. DATOS ORBITALES (TLE) DE NANOSAT-1B EN DIFERENTES FECHAS OBTENIDOS DE [SPA]. .....	233
TABLA 7-2. TID ACUMULADA EN EL PRIMER AÑO. DATOS DE LAS SIMULACIONES, Y MEDIDAS EXPERIMENTALES DE LOS RADFET DE NANOSAT-1B .....	241
TABLA 7-3. COMPARACIÓN DEL ESPESOR DE ALUMINIO EQUIVALENTE DE LA SIMULACIÓN REALIZADA CON LA ESTRUCTURA 3D DE NANOSAT-1B, Y LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LOS RADFET .....	242
TABLA 7-4. SOBREESTIMACIÓN DE LOS DATOS DE LA SIMULACIÓN POR COMPARACIÓN CON LAS MEDIDAS DE LOS RADFET DE NANOSAT-1B. ....	243
TABLA 7-5. ACTIVACIONES DE LDT A LO LARGO DE TODA LA EXPLOTACIÓN. ....	254
TABLA 8-1. SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE OSCURIDAD AL FLUJO EQUIVALENTE FRONTAL DE PROTONES UMBRALES. CORRESPONDE A LA DIAGONAL DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE OSCURIDAD (APÉNDICE D) .....	276
TABLA 8-2. SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE LUZ AL FLUJO EQUIVALENTE FRONTAL DE PROTONES UMBRALES <sup>25</sup> . CORRESPONDE A LA DIAGONAL DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE LUZ (APÉNDICE D) .....	276
TABLA 8-3. SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE OSCURIDAD AL FLUJO EQUIVALENTE FRONTAL DE PROTONES DE 80,10 MeV. COLUMNA OCTAVA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE OSCURIDAD (APÉNDICE D) .....	277
TABLA 8-4. SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE LUZ AL FLUJO EQUIVALENTE FRONTAL DE PROTONES DE 80,10 MeV. COLUMNA OCTAVA DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE LUZ (APÉNDICE D). ....	277
TABLA 8-5 INTERVALOS DE ACUMULACIÓN DE DATOS PARA LA GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE FLUJO ORBITALES .....	280
TABLA 8-6. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA RECUPERACIÓN (ANNEALING) DE LA CORRIENTE DE OSCURIDAD PARA APLICAR EN LA TORRE DE FOTODIODOS. FUE DISCUTIDO EN § 4.3.1.2. ....	283
TABLA 8-7. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA RECUPERACIÓN (ANNEALING) DE LA POTENCIA ÓPTICA DEL LED PARA APLICAR EN LA TORRE DE LED. FUE DISCUTIDO EN § 4.3.2.2. ....	283
TABLA 8-8. FACTOR DE DAÑO DE LA TORRE DE OSCURIDAD PRODUCIDO POR PROTONES FRONTALES. DATOS CORRESPONDIENTES A LA DIAGONAL DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE OSCURIDAD (APÉNDICE D) ....	284

TABLA 8-9. FACTOR DE DAÑO DE LA TORRE DE LUZ PRODUCIDO POR PROTONES FRONTALES. DATOS CORRESPONDIENTES A LA DIAGONAL DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD DE LA TORRE DE LUZ (APÉNDICE D) .....	284
TABLA 8-10. FACTOR DE DAÑO DE LA TORRE DE OSCURIDAD PRODUCIDO POR PROTONES FRONTALES DE 80,10 MeV. ....	285
TABLA 8-11. FACTOR DE DAÑO DE LA TORRE DE LUZ PRODUCIDO POR PROTONES FRONTALES DE 80,10 MeV.....	286
TABLA 8-12 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES EN ÓRBITA, EL COMPORTAMIENTO PREDICHO PARA EL DISEÑO, LOS REQUISITOS CIENTÍFICOS Y LAS CARACTERÍSTICAS CONSEGUIDAS EN LABORATORIO .....	296
TABLA 8-13. REGISTRO DE EVENTOS SOLARES QUE HAN AFECTADO AL ENTRONO TERRESTRE OBTENIDOS POR SENSORES A BORDO DE LA CONSTELACIÓN DE SATÉLITES GOES EN ÓRBITA GEO. ....	310
TABLA 9-1. TRL ALCANZADO POR LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES SENSORAS DE LDT Y SUS TECNOLOGÍAS .....	326
TABLA 9-2. FACTOR DE IMPACTO Y POSICIÓN EN LOS DIFERENTES RANKINGS DEL JCR DE LAS REVISTAS EN LAS QUE HA PUBLICADO EL DOCTORANDO .....	339
TABLA A-3. ORDEN DE EJECUCIÓN DE LAS IRRADIACIONES DE BÚSQUEDA DE ENERGÍAS UMBRAL EN LOS GIROS HORIZONTALES.....	350
TABLA A-4. ORDEN DE EJECUCIÓN DE LAS IRRADIACIONES DE BÚSQUEDA DE ENERGÍAS UMBRAL EN LOS GIROS VERTICALES.....	351
TABLA A-5. PARÁMETROS DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LOS DD.....	353
TABLA A-6. PARÁMETROS DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA A LA IONIZACIÓN.....	354
TABLA A-7. PARÁMETROS DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LOS DD.....	354
TABLA A-8. PARÁMETROS DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA A LA IONIZACIÓN.....	355
TABLA C-9. COMPARATIVA DE LA SENSIBILIDAD AL FLUJO DE LA MEDIDA DE TEMPERATURA CON EL TMP-36 ENTRE AMBAS TORRES .....	365

## Bibliografía

---

- [AP-8] D.M Sawyer and J.I. Vette. "AP-8-Trapped Proton Environment for Solar Maximun and Solar Minimun". NSSDC/WDC-A-R&S, 76-06 (1976) NASA Goddar Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- [Ape10] V. Apéstigue, J.M. Oter, C. Fernández, J.J. Jiménez. "**Monitores de Entorno Espacial en NANOSAT 1B: Monitor de Protones Las Dos Torres (LDT) y los dosímetros RadFET**". *Jornadas sobre resultados en órbita de Nanosat-01 y 1B. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA, Torrejón de Ardoz, 18-19 mayo 2010. PRESENTACIÓN ORAL*.
- [Arr11] Ignacio. ARRUEGO, "Sistemas de comunicación óptica inalámbrica multicanal para aplicaciones intra-satélite". Tesis Doctoral dirigida por el Dr. Héctor Guerrero Padrón y el Dr. F. José López Hernández. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. 2011
- [Arr09] Arruego, I. Guerrero, H. Rodriguez, S. Martinez-Oter, J. Jimenez, J.J. Dominguez, J.A. Martin-Ortega, A. de Mingo, J. Rivas, J. Apestigue, V. Sanchez, J. Iglesias, J. Alvarez, M.T. Gallego, P. Azcue, J. Ruiz de Galarreta, C. Martin, B. Alvarez-Herrero, A. Diaz-Michelena, M. Martin, I. Tamayo, F. Reina, M. Gutierrez, M. Sabau, L. Torres, J., "**OWLS: a ten-year history in optical wireless links for intra-satellite communications**", IEEE Journal in Selected Areas on Communications, Issue 9, Vol. 27, pp. 1599-1611, December 2009. DOI:10.1109/JSAC.2009.091210.
- [Arr10] I. Arruego, M. Díaz-Michelena, J.J. Jiménez, J. Martínez, V. Apéstigue, M. González-Guerrero, J. Azcue, A. Valverde, V. de Manuel, J. A. Domínguez, I. Martín, B. Martín, J. Alvarez, M. Alvarez, C. Hernando, M.F. Cerdán, C. Ruiz de Galarreta, J. Sánchez, G. Martínez, L. Vázquez, H. Guerrero, "**Development of miniaturized instrumentation for Planetary Exploration and its application to the Mars MetNet Precursor Mission**", *Proceeding of the European Geosciences Union – 7th General Assembly, Vienna, Austria 02-07 May 2010. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010. PÓSTER*.
- [Buch02] S. Buchner, P. Marshall, S. Kniffn and K. LaBel. "Proton Test Guideline Development–Lessons Learned" – NASA/Goddard Space Flight Center– NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP), Program Electronics Radiation Characterization (ERC) Project and Defense Treat Reduction Agency. (08/22/2001). [http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/Proton\\_testing\\_guidelines\\_2002.pdf](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/Proton_testing_guidelines_2002.pdf)
- [Cal08] Philippe Calvel, Catherine Barillot, Alain Porte, Gérard Auriel, Christian Chatry, Pierre-François Peyrard, Giovanni Santin, Robert Ecoffet, and Thomas M. Jordan, "Review of Deposited Dose Calculation Methods Using Ray Tracing Approximations0", IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 55, No. 6, December 2008, pp. 3106-3113. DIO: 10.1109/TNS.2008.2007298
- [Cla02] C. Claeys and E. Simon, "Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices", Springer-Verlag (Berlin) Heidelber, 2002.
- [Cer11] Cerdán, M. F., Fernández, A. B., Jiménez, J. J. y Díaz-Michelena, M., "Witnessing variations in the Earth magnetic field by means of NANOSAT-1B COTS AMR magnetic sensor"; Geophysical Research Abstracts, vol. 13, EGU2011-6768-2, 2011.

## Bibliografía

- [Che34] Cherenkov, P. A. “Vidimoe svechenie chistyykh zhidkosti pod deistviem  $\gamma$ -radiatsii.” Dokl. AN ASSR, 1934, vol. 2, no. 8
- [CREES] M.S. Gussenhoven, E.G. Mullen and D.H. Brautigam. "Improved Understanding of the Earth's Radiation Belts from the CRRES Satellite". IEEE Trans. Nucl. Sci., 43, 2 (1996) pp 353-368.
- [Dres98] P. V. Dressendorfer, “*Basic Mechanisms for the New Millenium*” Notes from the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, Newport Beach CA (1998).
- [FECYT\_II] <https://www.recursoscientificos.fecyt.es/indices-de-impacto>  
(Fecyt- Índices de impacto)
- [FECYT\_I] <https://www.recursoscientificos.fecyt.es/manual-de-uso-de-la-herramienta-jcr>  
(Fecyt – JCR)
- [Fer10] C. P. Fernandez, C. Hernando, I. Arruego, M. T. Alvarez, M. M. Pejovic, A. B. Jaksic, “LowDose RADFET Dosimetry During in-Orbit Experiment on Board NANOSAT1B”, proceedings of the 2010 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference – NSREC 2010, Denver, Colorado, USA, July 19th-23th, 2010.
- [Fle95] D. Fleetwood “*A First-Principles Approach to Total Dose Hardness Assurance*” Notes from the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, Madison WI (1995).
- [Gon13] M. Gonzalez-Guerrero, J. J. Jiménez, C. Hernando, M. T. Álvarez, and H. Guerrero, “**Dosimeter for The Two Towers in SEOSAT-INGENIO based on TMP36**”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 60, No. 4, August 2013, pp. 2461-2468. DIO: 10.1109/TNS.2013.2257848
- [Gue99] H. Guerrero, "Evolution and trends in microsensors: towards the Next Century Transducing", Proceeding of 2<sup>a</sup> International Conference on Integrated Micro/Nano Technologies for Space System, Pasadena, Los Angeles (1999).
- [Gue06] H. Guerrero, I. Arruego, S. Rodríguez, M.T. Álvarez, J.J. Jiménez, J. Torres, P. Pelissou, C. Carron, I. Hernandez, P. Plancke. “**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications**” *ICSO – 6th International Conference on Space Optics. ESA/ESTEC, Noordwijk, NL, 27-30 June 2006. PÓSTER*. DOI: 2006ESASP.621E.177G.
- [Gue07] H. Guerrero, I. Arruego, S. Rodríguez, M.T. Álvarez, J.J. Jiménez, J. Torres, P. Pelissou, C. Carron, I. Hernandez, P. Plancke. “**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications Development of a Demonstrator & Current Status**”. *Intl. Wireless for Space Workshop. Univ. Colorado, Colorado Springs, USA, 22 enero 2007*.
- [Gue10] H. Guerrero, Ignacio Arruego, Marina Diaz-Michelena, Juan J. Jiménez, Javier Martínez, Víctor Apéstigue, Miguel Gonzalez-Guerrero, Joaquin Azcue, Alberto Valverde, Victor de Manuel, Jose A. Domínguez, Israel Martin, Boris Martin, Javier Alvarez, Maite Alvarez, Carlos Hernando, Miguel F. Cerdán, Claudia Ruiz de Galarreta, Jaime Sanchez, German Martinez, and Luis Vazquez. “**Development of miniaturized instrumentation for Planetary Exploration and its application to the Mars MetNet Precursor Mission**” *European Geosciences Union – 7<sup>th</sup> General Assembly – Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010*.

- [Har04] A. Haran , A. Jaksic, N. Refaeli, A. Eliyahu, D. David, J. Barak, “Temperature Effects and Long Term Fading of Implanted and unimplanted Gate Oxide RADFETs”, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, no 5, pp. 2917 – 2921, 2004
- [Hes68] W. Hess, “The Radiation Belt and Magnetosphere”. Blaisdell Publishing Company
- [Hol93] “*Handbook of Radiation Effects*”. Holmes-Siedle, Adams. Publicado en Estados Unidos por Oxford University Press INC., New York. 1993
- [Huh93] M. Huhtinen and P. A. Aarnio, Pion induced displacement damage in silicon devices, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **335**, 580–582, (1993). [http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)91246-J](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(93)91246-J)
- [Huh96] Mika Huhtinen “The Radiation Environment at the CMS Experiment at the LHC” Tesis doctoral presentada en *Helsinki University of Technology* en 1996.
- [Iba07] S. Ibarmia, S. Estevez, “LTD SPACE RADIATION ASSESSMENT STUDY” Documento de proyecto. Referencia INTA: LTD/4520/TNO/001/INTA.Iss 1, 07 / 2007
- [Jak02] A. Jaksic, G. Ristic, M. Pejovic, A. Mohammadzadeh, C. Sudre, and W. Lane, “Gamma-ray irradiation and post-irradiation response of high dose range RADFETs,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, no. 3, pp. 1356–1363, 2002.
- [Jak02a] A. Jaksic, G. Ristic, M. Pejovic, A. Mohammadzadeh, and W. Lane, “Characterization of radiation response of 400 nm implanted gate oxide RADFETs,” in Proc. 23rd Int. Conf. Microelectronics (MIEL’2002), vol. 2, Nis, Serbia, May 2002, pp. 727–730.
- [JCR] <http://thomsonreuters.com/en/products-services/scholarly-scientific-research/research-management-and-evaluation/journal-citation-reports.html> (JCR – Thomson Reuters)
- [Jim12] J. J. Jiménez, J. M. Oter, V. Apéstigue, C. Hernando, S. Ibarmia, W. Hajdas, J. Sánchez-Páramo, M. T. Álvarez, I. Arruego, and H. Guerrero, “**Proton Monitor Las Dos Torres: First Intercomparison of In-Orbit Results**”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 59, No. 4, August 2012, pp. 1092-1098. DIO: 10.1109/TNS.2012.2198241
- [Jim11] J.J. Jiménez, F. J. ÁLVAREZ-RÍOS, J.M. Oter, I. Arruego, J Azcue, M. González-Guerrero, I. Martín, G. Martínez, J. Moreno-Ventas, M. Reina, J. Rivas, C. Ruiz de Galarreta, L.M Sánchez-Brea J. Sánchez-Páramo, Alberto VALVERDE, L. Vázquez, H. Guerrero. “**Sensor espectral de irradiancia solar para estudios atmosféricos planetarios**”. 7<sup>a</sup> Reunión Española de Optoelectrónica - OPTOEL 2011. S1-50. Santander, España, 29 de Junio – 1 de julio 2011.
- [Jim10] J.J. Jiménez, J.M. Oter, V. Apéstigue, I. Arruego, S. Ibarmia, S. Esteve, J. Sánchez-Páramo, W. Hajdas, C. Hernando, M.T. Álvarez, H. Guerrero. “**Las Dos Torres: A Radiation Monitor for NANOSAT 1B**”. *Nuclear and Space Radiation effects on Components - NSREC 2010 .PH-5L. Denver, 19 – 23 julio 2010. POSTER*. <http://www.nsrec.com/latenewspubs2010.pdf>
- [Jim07] Jiménez J.J., Sanchez-Paramo J., Alvarez M.T., Dominguez J.A., Oter J.M., Arruego I., Tamayo R., Guerrero H., “Proton radiation effects on medium/large area Si PIN photodiodes for Optical Wireless Links for Intra-Satellite Communications (OWLS)”, *Proc. IEEE Radiation Effects Data Workshop*, 2007 pp.73 – 79. DOI: 10.1109 / REDW.2007.4342543.



- [Jim06] J.J. Jimenez, M.T. Alvarez, R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Dominguez, I. Arruego, J. Sainchez-Paramo, H. Guerrero, “**Proton radiation effects in high power LED and IREDs for Optical Wireless Links for intra-Satellite communications (OWLS)**”, *proceedings of the 2006 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC 2006), Ponte Vedra Beach, Florida July 17-21, 2006. IEEE Trans. Nucl. Sci., Catalog Number 06TH8913, pp. 77-84, 2006. PÓSTER*. DOI: 10.1109/REDW.2006.295472
- [Jim06a] J.J. Jiménez, M.T. Álvarez, J. Sánchez-Páramo, R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Domínguez, I. Arruego, H. Guerrero. “Proton irradiation of medium / large area PIN si photodiodes for optical wireless links for intra-satellite communication (owls) ”, *9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2006),, Glyfada, Grecia. 27-29 de septiembre de 2006. PÓSTER*.
- [Jim05] Jimenez, J.J.; Alvarez, M.T.; Oter, J.M.; Dominguez, J.A.; Tamayo, R.; Arruego, I.; Guerrero, H., “Proton Radiation effects in medium/large area photodiodes and high power LED for Optical Wireless Links for intra Satellite communications (OWLS)”, *proceedings of the 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2005), Cap d’Adge, France, 19-23 Sept. 2005 pp:PW10-1-PW10-8. PÓSTER*. DOI 10.1109/RADECS.2005.4365651.
- [Jim04] J.J. Jimenez, J.M. Oter, J.A. Dominguez, M.T. Alvarez, I. Arruego, P.P. Valdivieso, J. Fuentes, H. Guerrero. “**Irradiation of LED and photodiodes for Optical Wireless Links for intra-Satellite communications (OWLS)**”. *5th Radiation Effects on Components and Systems (RADECS-2004). Workshop, Madrid - Spain September 22-24, 2004, pp. 101-108*.
- [Joh00] A. H. Johnston, Miyahira, T.F. “Characterization of proton Damage in Light-Emitting Diodes” IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 47, No. 6, December 2000, pp. 2500-2507  
DIO: 10.1109/23.903799
- [Joh01] A. H. Johnston, “Proton displacement damage in light-emitting and laser diodes” IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 48, No. 5, October 2001, pp. 2500-2507  
DIO: 10.1109/23.960362
- [Lar68] F. Larin, “Radiation Effects in Semiconductors,”Wiley (London), 1968.
- [Ler99] Jean-Luc Leray, “*Total Dose Effects: Modeling for Present and Future*” Notes from the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, Norfolk VA (1999).
- [Lin06] R. Lindberg, G. Santin, H. Evans, E. Daly, and P. Nieminen. “*Detailed Comparison of Monte Carlo and Sector-Shielding Analyses for Space Applications*”, IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 53, No. 6, december 2006, pp. 3745-3749 DIO: 10.1109/TNS.2006.885373
- [Lin09] G. Lindström et al., Radiation hard silicon detectors-developments by the RD48 (ROSE) collaboration, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **466**, 308–326, (2001). [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00560-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00560-5)
- [Mar91] P.W. Marshall, C.J. Dale, and E.A. Burke, “Proton-induced displacement damage fluctuations in silicon microvolumes,” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, vol. B56-57, pp. 847-850, May 1991.
- [Mar99] P.W. Marshall and C. J. Marshall, “Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers,” Notes from the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, Norfolk VA (1999).

- [Mes92] G. Messenger and M.S. Ash, "Effects of radiation on electronic systems," Von Nostrand Reinhold (NewYork), 1992.
- [MEIGA] <http://meiga-metnet.org/>
- [Mic09] M.D.Michelena, M.F.Cerdán, I.Arruego, "NANOSAT-01: Three years of mission. Magneticscientific results", Sensor Letters, Vol 7, No 3, June 2009 , pp. 412-415(4). DOI: 10.1166/sl.2009.1069
- [Mic10] Michelena, M.D.; Arruego, I.; Oter, J.M.; Guerrero, H., "COTS-Based Wireless Magnetic Sensorfor Small Satellites", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, Vol. 46,Iss. 2, pp 542-557, May 2010. DOI: 10.1109/TAES.2010.5461640
- [Mol99] M. Moll, E. Fretwurst, and G. Lindström, Leakage current of hadron irradiated silicon detectors material dependence, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **426**, 87–93, (1999). [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01475-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01475-2)
- [Mol02] M. Moll, E. Fretwurst, M. Kuhnke, and G. Lindström, Relation between microscopic defects and macroscopic changes in silicon detector properties after hadron irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **186**, 100–110, (2002). [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00866-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00866-7)
- [Mon14] E. Del Monte, A. Rachevski, G. Zamp, N. Zamp, P. Azzarello, E. Bozzo, R. Campana, S. Diebold, Y. Evangelista, E. Perinati, M. Feroci, M. Pohl, A. Vacchi, "*Measurement of the effect of non ionising energylosses on the leakage current of silicon driftdetector prototypes for the LOFT satellite*", Instrumentation and Methods for Astrophysics, 21 paginas (2014), arXiv:1405.5466v3. <http://arXiv.org/pdf/1405.5466v3.pdf>
- [Nat99] Radiation Owner's Manual. National Semiconductor, Rev 1999
- [NIST\_P] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>
- [Ono03] S. Onoda, T. Hirao, J. S. Laird, H. Mori, H. Itoh, T. Wakas a, T.Okamoto, and Y. Koizumi. "Displacement damage degradation of ion/induced charge in Si pin photodiode". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B206 (2003) pp 444-447.
- [RADECS11] S. Martín, S. K. Höffgen, G. Berger, Héctor Guerrero, "Compendium of International Irradiation Test Facilities" 1ª edición. Distribuida a los asistentes de RADECS 2011.
- [Rav06] Federico RAVOTTI, "*Development and Characterisation of Radiation Monitoring Sensors for the High Energy Physics Experiments of the CERN LHC Accelerator*". Tesis Doctoral dirigida por M L. Dusseau. Université Montpellier II. 2006
- [PSB97] D. Heynderickx, M. Kruglanski, V. Pierrad, J. Lemaire, M.D, Looper and J.B. Blahe. "A Low Altitude Trapped Proton Model for Solar Minimun Conditions Based on SAMPEX/PET Data", IEEE Trans. Nucl. Sci., 46 (1999) pp. 1475-1480.
- [Rod08] S. Rodríguez, I. Arruego, N. Karafolas, P. Pelissou, F. Tortosa, B. Alison, M.T., Álvarez, V. Apestigue, J. Ázcue, J. Barbero, C. Carron, J. Catalán, J.R. De Mingo, J.A. Domínguez, P. Gallego, J. García-Prieto, J.J. Jiménez, D. López, F. López-Hernández, A. Martín-Ortega, J. Martínez-Oter, G. Mercadier, F. Perán, A. Perera, R. Pérez-Jiménez, E. Poves, J. Rabadán, M. Reina, J. Rivas, H. Rouault, J. Rufo, C. Ruiz de Galarreta, D. Scheidel, C. Theroude, M. van Uffelen, J. Sánchez-Páramo, E. Armandillo, P. Plancke, H.Guerrero. "**Optical Wireless Intra-Spacecraft Communications**". *ICSO – 8th International Conference on Space Optics. Toulouse, France, 14-17 octubre 2008*. PRESENTACIÓN ORAL

## Bibliografía

- [Seg09] G. Segneri et al., Measurement of the Current Related Damage Rate at  $-50^{\circ}$  C and Consequences on Macropixel Detector Operation in Space Experiments, IEEE Transactions on Nuclear Science, **56**, 3734–3742, (2009).  
<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2033911>
- [Sin94] J. Singh, “Semiconductor Devices: An Introduction,” McGraw-HILL 1994.
- [Sro88] J.R. Srour, “*Displacement Damage Effects in Electronic Materials, Devices, and Integrated Circuits*,” Notes from IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, Portland OR (1988).
- [Sro00] J.R. Srour and D.H. Lo, “Universal Damage Factor for Radiation-Induced Dark Current in Silicon Devices” IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol-47, no. 6, pp. 2451–2458 (2000).  
DIO:10.1109/23.903792
- [Sro03] J.R. Srour, C. J. Marshall, “Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices” IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol-50, no. 3, pp. 653–670 (2003).
- [Sro13] J.R. Srour, J.W. Palko “Displacement Damage Effects in Irradiated Semiconductor Devices” IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol-60, no. 3 pp. 1740–1766 (2013).
- [Spa] <http://www.space-track.org>
- [SPENVIS] <http://www.spennis.oma.be/credits.php>
- [Sum92] G.P. Summers, “Displacement Damage: Mechanisms and Measurements,” Notes from IEEE Nuclear and Radiation Effects Conference Short Course, New Orleans LA (1992).
- [Sum93] G. P. Summers et al., *Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol **40**, 1372–1379, (1993).  
<http://dx.doi.org/10.1109/23.273529>
- [SWPC\_NOAA] <http://www.swpc.noaa.gov/>
- [NOAA\_P] <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux>  
[http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_plots/](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_plots/)
- [Tam37] Tamm, I. E., and I. M. Frank “Kogerentnoe izluchenie bystrogo elektrona v srede.” Dokl. AN ASSR, 1937, vol. 14, no. 3
- [Tam10] Remo Tamayo, José Alonso, Juan José Jiménez, Ignacio Arruego, Héctor Guerrero, “OpticalWireless Links for intra-Satellite Communications: Reflection Models and Hardware Optimization”, AIAA Journal Of Aerospace Computing, Information and Communication, Vol. 7, No. 3, pp:118-133, Iss. 12, 2010. DOI: 10.2514/1.30271.
- [Tolkien] J.R.R Tolkien “The Two Towers” London: George Allen & Unwin, Ltd. 1954
- [UPM1] Programa de postgrado en comunicaciones por satélite, Modulo: Introducción. Organizado por UPM, INTA, INSA, EUITT, HISPASAT, RCP.
- [Vas96] Angela Vasilescu – The NIEL hypothesis applied to neutron spectra of irradiation facilities and in the ATLAS and CMS SCT, ROSE/TN/97-2 (1997); also Tatiana Angelescu, Angela Vasilescu – Nucl. Instrum. and Meth. A374 (1996) 85
- [Vas00] A. Vasilescu and G. Lindstroem, Displacement damage in silicon, on-line compilation.  
<http://rd50.web.cern.ch/rd50/NIEL/default.html>

- [Vas00a] Angela Vasilescu – Notes on the fluence normalisation based on the NIEL scaling hypothesis, ROSE/TN/2000–02 (2000).
- [Wic82] J. Wiczer, L.R. Dawson, G.C. Osbourn, C.E. Barnes. “Permanent damage effects in Si and AlGaAs/GaAs Photodiodes”. IEEE Trans. Nucl. Sci., 29 (1982), pp. 1539-44.
- [Wil94] “*Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*”. [William R. Leo](#). Publicado por Springer Science & Business Media, 1994.
- [Woo81] S. Wood, N.J. Doyle, J.A. Spitznagel, W.J. Choyke, R.M. More, J.N. McGruer and R.B. Irwin, “Simulation of Radiation Damage in Solids” IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 4107 (1981).
- [WOS] [http://wokinfo.com/media/pdf/qrc/wos\\_qrc\\_sp.pdf](http://wokinfo.com/media/pdf/qrc/wos_qrc_sp.pdf) (Web of Science)